

DAUERHAFTIGKEIT VON BETON BEI KOMBINierter PHYSIKALISCH-CHEMISCHER BEANSPRUCHUNG IM HINBLICK AUF VERWITTERUNGSPROZESSE

Forschungsbericht

**Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. D. Bunte**

März 1991

**Diese Arbeit wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft
gefördert.**

Az.: Ro 288/1-3

Antrag vom 01.11.1984

Kennwort: Komplexbeanspruchung

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Liste der verwendeten Bezeichnungen, Begriffe und Abkürzungen	IX

A. Überblick über die Forschungsziele und den Forschungsansatz

1.	Forschungsziel	A1
1.1	Baupraktischer Hintergrund	A1
1.2	Anwendungsbereich und Witterungsbedingungen	A2
1.3	Forschungsziele	A3
2.	Vorgehen	A4
3.	Gliederung des Berichtsbands	A6
4.	Überblick über die wesentlichen Ergebnisse	A8
5.	Literaturverzeichnis	A10

Abbildungen

B. Versuchsprogramm und Versuchstechnik

1.	Überblick	B1
2.	Versuchskörper	B2
2.1	Auswahl der Versuchskörper und Umfang der Eignungsversuche	B2
2.2	Wände A - D	B4
2.2.1	Überblick	B4

2.2.2	Zusammensetzung der Betone	B5
2.2.3	Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper	B5
2.2.4	Nachbehandlung und Lagerung	B5
2.2.5	Bohrkernentnahme	B7
2.2.6	Festbetoneigenschaften	B8
2.3	Wände I - VIII	B8
2.3.1	Überblick	B8
2.3.2	Zusammensetzung der Betone	B9
2.3.3	Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper	B9
2.3.4	Nachbehandlung und Lagerung	B10
2.3.5	Bohrkernentnahme	B11
2.4	Untersuchungsmaterial aus bestehenden Bauwerken	B12
2.4.1	Überblick	B12
2.4.2	Beckumer Versuchshäuser	B12
2.4.3	Institutswand	B14
2.4.4	Kühlhauswand	B15
3.	Versuchstechnik	B15
3.1	Auswahlkriterien	B15
3.2	Quecksilberdruckporosimetrie	B16
3.3	Porositätsbestimmung durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum	B18
3.4	Versuche zur CO ₂ -Diffusion	B20
3.5	Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme	B23
3.6	Absorptionsversuche am Bauwerk	B24
3.6.1	Initial Surface Absorption Test (ISAT)	B24
3.6.2	Wassereindringprüfung	B26
3.7	Versuchseinrichtung zur zeitgerafften, künstlichen Bewitterung von Beton	B28
4.	Übersicht über die Versuchsplanung und den Versuchsumfang	B33
4.1	Gliederungskriterien	B33
4.2	Feststellung von Porosität und Dichtigkeit (Wände A - D)	B33
4.3	Eignungsnachweis der Versuchstechniken (Wände I - VIII)	B34
4.4	Porosität und Dichtigkeit bestehender Bauwerke	B35

4.5	Untersuchung der Auswirkungen einer zeitgerafften künstlichen Bewitterung	B35
5.	Ergebnisse der Eignungsversuche	B36
5.1	Überblick	B36
5.2	Eignungsversuche der einzelnen Meßtechniken	B37
5.2.1	Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme	B37
5.2.1.1	Prüfstreuung	B37
5.2.1.2	Materialstreuung	B40
5.2.2	Diffusionsversuche	B41
5.2.2.1	Prüfstreuung	B41
5.2.2.2	Materialstreuung	B43
5.2.3	Versuche zur Porositätsbestimmung mittels Wassersättigung	B43
5.2.4	ISA-Versuche	B44
5.2.4.1	Prüfstreuung	B44
5.2.4.2	Materialstreuung	B45
5.3	Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse	B46
6.	Literaturverzeichnis	B47

Tabellen

Abbildungen

C. Theoretische Voraussetzungen und Methoden der Versuchsauswertung

1.	Einleitung	C1
2.	Makromodell des Betongefüges	C2
2.1	Modell der Verteilung von Zuschlag und Zementstein unter Beachtung des Einflusses der Schalung	C4
2.2	Zusammenfassung und Auswirkungen auf die Porosität und Dichtigkeit	C5

3.	Physikalische und betontechnologische Aspekte des Gas- und Flüssigkeitstransportes in Betonporen	C7
3.1	Physikalische Gegebenheiten	C7
3.1.1	Diffusion von Gasen in ideal geraden Poren	C8
3.1.1.1	Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Porosität und dem Porenradius	C10
3.1.1.2	Einfluß der Gasart	C13
3.1.2	Kapillare Wasseraufnahme ideal gerader Poren	C14
3.1.2.1	Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA-Wertes von der Porosität und dem Porenradius	C16
3.1.2.2	Vergleich des Diffusions- und Absorptionsverhaltens	C16
3.2	Betontechnologische und baupraktische Parameter	C18
3.2.1	Dichtigkeit infolge Betonqualität	C18
3.2.2	Dichtigkeit infolge Feuchtegehalt	C19
4.	Auswertung von Porenradienverteilungen: Methoden und Ziele	C21
4.1	Ziele der Auswertung	C21
4.2	Methoden der Auswertung von Porenradienverteilungen	C22
4.2.1	Statistische Methoden	C22
4.2.2	Physikalische und empirische Methoden	C23
4.2.3	Aussagekraft der Kennwerte	C23
4.3	Bestimmung von Fraktilradien	C24
4.4	Auswertung nach physikalischen Gesichtspunkten	C26
5.	Einfluß von Hydratation und Karbonatisierung auf das Porensystem	C27
5.1	Hydratationseinflüsse	C27
5.2	Karbonatisierungseinflüsse	C29
5.3	Abschätzung des Hydratationsverlaufes von PZ-Betonen	C30
5.4	Schlußfolgerungen für die Auswertung der Versuchsergebnisse	C31
5.5	Schlußfolgerungen über den Einfluß der Witterung auf die Porosität und Porenradienverteilung von Beton	C31
6.	Entwicklung eines vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells	C33
6.1	Karbonatisierung	C33
6.2	Verknüpfung Absorption-Diffusion	C35

6.3	Erläuterung zum Beurteilungskriterium	C37
6.4	Vorläufiges Bemessungsdiagramm der Betondichtigkeit	C37
6.4.1	Erläuterungen	C37
6.4.2	Vorläufiges Bemessungsdiagramm	C39
7.	Literaturverzeichnis	C40

Tabellen

Abbildungen

D. Versuchsergebnisse und deren Interpretation

1.	Überblick über die Auswertung	D1
2.	Auswertung der Porenradialverteilungen	D2
2.1	Umfang der Auswertungen	D2
2.2	Auswirkungen der Hydratation und Karbonatisierung auf die Fraktilradial	D4
2.3	Einfluß der Lagerungsbedingungen	D4
2.3.1	Wand A und B	D4
2.3.1.1	Fraktilradial	D4
2.3.1.2	Transportrelevante Porenkennwerte	D8
2.3.2	Versuchshaus 1 aus Beckum	D9
2.3.2.1	Fraktilradial	D9
2.3.2.2	Transportrelevante Porenkennwerte	D10
2.3.3	Kleinkörper der künstlichen Bewitterung zugehörig den Wän- den A und B	D11
2.3.3.1	Fraktilradial	D11
2.3.3.2	Transportrelevante Porenkennwerte	D12
2.4	Einfluß der Nachbehandlung	D13
2.4.1	Wände A - D	D13
2.4.1.1	Fraktilradial	D13
2.4.1.2	Transportrelevante Porenkennwerte	D14
2.5	Einfluß der Betonzusammensetzung	D17

2.5.1	Einfluß des w/z-Werts	D17
2.5.1.1	Fraktilradien der Wände A und B	D17
2.5.1.2	Transportrelevante Porenkennwerte der Wände A und B	D17
2.5.1.3	Transportrelevante Porenkennwerte von Haus 2 und 4 in Beckum	D18
2.5.1.4	Fraktilradien der Kleinkörper der künstlichen Bewitterung der Wände A und B	D19
2.5.1.5	Transportrelevante Porenkennwerte der künstlich bewitter- ten Kleinkörper der Wände A und B	D19
2.5.2	Einfluß der Zementart	D19
2.5.2.1	Vergleich der Versuchshäuser 1 und 4	D19
2.5.2.2	Vergleich der Versuchshäuser 3 und 4	D21
2.5.3	Einfluß der Sieblinie und des Zuschlaggrößtkorns	D21
2.5.3.1	Einfluß auf die Fraktilradien der Wände BF, C und D	D21
2.5.3.2	Einfluß auf die transportrelevanten Porenkennwerte der Wän- de BF, C und D	D22
2.5.3.3	Einfluß der Sieblinie bei künstlicher Bewitterung	D23
2.6	Einfluß des Betonierdatums	D23
2.6.1	Einfluß auf die Fraktilradien von Wand C und D	D23
2.6.2	Einfluß auf die transportrelevanten Porenkennwerte von Wand C und D	D24
2.7	Einfluß der versuchsvorbereitenden Trocknungsart	D24
2.8	Nicht dargestellte Untersuchungen	D25
3.	Auswertungen der Laboruntersuchungen zur Dichtigkeit	D25
3.1	Erläuterung zu den Auswertungen	D25
3.2	Auswertung der Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme	D26
3.2.1	Ergebnisse der Wände A - D	D26
3.2.1.1	Einfluß der Lagerungsbedingungen (Wandpaar A und B)	D28
3.2.1.2	Einfluß der Nachbehandlung (Wand A -D)	D31
3.2.1.3	Einfluß der Betonzusammensetzung	D32
3.2.1.3.1	Einfluß des w/z-Werts	D32
3.2.1.3.2	Einfluß der Sieblinie	D33
3.2.1.4	Einfluß des Betonierdatums	D33
3.2.2	Ergebnisse der Versuchshäuser aus Beckum	D33
3.3	Auswertung der CO ₂ -Diffusionsversuche	D35

3.3.1	Ergebnisse der Wände A - D	D36
3.3.1.1	Einfluß der Lagerungsbedingungen	D36
3.3.1.2	Einfluß der Nachbehandlung	D36
3.3.1.3	Einfluß des w/z-Werts	D36
3.3.1.4	Einfluß der Sieblinie	D37
3.3.1.5	Einfluß der Trocknungsart	D37
3.3.2	Ergebnisse der Versuchshäuser und der Kühlhauswand	D38
3.3.3	Gesamtporosität infolge Wassersättigung	D40
4.	Auswertung der zerstörungsfreien Bauwerksmessungen	D40
4.1	Umfang der durchgeführten Auswertungen	D40
4.2	Ergebnisse der Messungen auf den Oberflächen der Wände A - D	D42
4.3	Ergebnisse der ISA-Messungen an den Versuchshäusern	D44
5.	Korrelation der Ergebnisse	D45
5.1	Korrelation von Porenkennwerten und Dichtigkeit	D45
5.1.1	Einfluß der Porenstruktur auf die Korrelation von Porosität und Dichtigkeit	D46
5.1.2	Einflüsse auf die Porenstruktur	D47
5.1.2.1	Korrelation von Wasseraufnahmekoeffizient und Absorptionsprodukt	D47
5.1.2.2	Korrelation des ISA_{10} -Wertes mit dem Absorptionsprodukt	D48
5.1.2.3	Korrelation von D_{CO_2} mit dem Diffusionsprodukt	D49
5.2	Korrelation der transportrelevanten Porenkennwerte	D50
5.2.1	Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten	D51
5.2.2	Korrelation der transportrelevanten Porenradien	D52
5.2.3	Korrelation von Absorptions- und Diffusionsprodukt	D52
5.2.4	Korrelation der Wasserkapazität mit der kapillar wirksamen Porosität	D53
5.2.5	Korrelation der Porenstrukturfaktoren der Diffusion und Absorption	D53
5.3	Korrelation der Transportkoeffizienten der unterschiedlichen Transportarten	D54
5.3.1	Korrelation Wasseraufnahmekoeffizient und ISA_{10} -Wert	D55
5.3.2	Korrelation CO_2 -Diffusionskoeffizient und ISA_{10} -Wert	D55

6.	Aufstellung des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells	D56
6.1	Vorläufige Bemessungsdiagramme der Betondauerhaftigkeit	D57
6.1.1	Bemessungsdiagramme auf Grundlage der Porenkennwerte	D57
6.1.2	Bemessungsdiagramme auf Grundlage von ISA-Messungen	D58
6.2	Anwendung des Dauerhaftigkeitsmodells auf die Versuchshäuser in Beckum	D59
6.3	Zur Aussagesicherheit des Dauerhaftigkeitsmodells	D61
7.	Literaturverzeichnis	D64

Tabellen

Abbildungen

VERWENDETE BEZEICHNUNGEN, ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFE

a) Begriffe

- Versuchskörper

Wand A - D: Wände die in verschiedenen Lagerungsklimaten lagerten und der Anwendung der Versuchstechniken dienten. Die Wände unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und Nachbehandlung.

Wand I - VIII: Im Freien aufgestellte Versuchswände unterschiedlicher Zusammensetzung und Nachbehandlung zur Feststellung der Meß- und Materialstreuung.

Alter Beton: Sammelbegriff der übrigen Betone mit einem Alter von mehr als 20 Jahren. Ihre weitere Bezeichnung erfolgt nach dem Bauwerksstandort (4 Versuchshäuser aus Beckum) oder der Bauwerksfunktion (Institutswn, Kühlhauswand).

- Lagerungsbedingungen

F-Lagerung: Bezeichnung für die Beanspruchung der ungeschützt im Freien aufgestellten Wände.

L-Lagerung: Bezeichnung für die Beanspruchung der im Labor aufgestellten Wände.

K-Lagerung: Bezeichnung für die Beanspruchung der künstlich bewitterten Versuchskörper.

- Nachbehandlungsarten

nachbehandelte Wandfläche: Kurzbezeichnung für die nach einem Tag ausgeschalte und dann 6 Tage mit feuchten Tüchern und Folie abgedeckte Wandfläche.

nicht nachbehandelte Wandfläche: Kurzbezeichnung für die nur einen Tag in Schalung verbleibende Wandfläche.

b) Bezeichnungen

Versuchsdurchführung

b	Probenbreite
c	Dicke der Betondeckung
d	Probenhöhe bzw. -durchmesser
D_i	Bezeichnung für die Proben der CO_2 -Diffusionsversuche (i Fußzeiger für die Entnahmetiefe)
F	Prüffläche
F_{Kappe}	Prüffläche der Meßkappe
$F(t)$	Zum Zeitpunkt t vom kapillar aufgesaugten Wasser durchströmte Fläche
g_w	Aufgesaugte Wassermenge bezogen auf die Probengrundfläche
g_f	Aufgesaugte Wassermenge im Zustand der Probendurchfeuchtung (bezogen auf die Probengrundfläche)
ISA	Meßwert des initial surface absorption tests
ISAT	Abkürzung für initial surface absorption test
$K_{i,j}$	Bezeichnung für die Proben der kapillaren Wasseraufnahme (i Fußzeiger für die Entnahmetiefe; j Fußzeiger für die Probenanzahl)
l	Probenlänge
M_A	Probengewicht unmittelbar vor Versuchsbeginn
$M_{\text{(über Wasser)}}$	Gewicht einer unter Atmosphärendruck gesättigten Probe bei Wiegung in Luft

$M_{\text{(unter Wasser)}}$	Gewicht einer unter Atmosphärendruck gesättigten Probe bei Wiegung unter Wasser
$M_V(\text{über Wasser})$	Gewicht einer unter Vakuumdruck gesättigten Probe bei Wiegung in Luft
$M_V(\text{unter Wasser})$	Gewicht einer unter Vakuumdruck gesättigten Probe bei Wiegung unter Wasser
M_{105}	Trockengewicht der Probe
O_i	Bezeichnung des Bohrkernes i aus der Ostwand der Versuchshäuser aus Beckum
p_a	äußerer Druck
$P_{i,j}$	Bezeichnung der Proben für die Quecksilberdruckporosimetrie (i Fußzeiger für die Entnahmetiefe, j Fußzeiger der Probenanzahl)
t_i	Meßzeitpunkt i nach Versuchsbeginn
t_s	Saugzeit seit Versuchsbeginn
t_{sf}	Zeitpunkt der Probendurchfeuchtung infolge kapillarer Wasseraufnahme
(T)	Bezeichnung für die versuchsvorbereitende Trockenschränklagerung
V	Probenvolumen
$V_{i,j}$	Bezeichnung für die Proben der Porositätsbestimmung durch Wassersättigung (i Fußzeiger für die Entnahmetiefe; j Fußzeiger für die Probenanzahl)
(V)	Bezeichnung für die versuchsvorbereitende Vakuumtrocknung
u_A	Wassergehalt der Probe zu Versuchsbeginn
W_i	Bezeichnung des Bohrkernes i aus der Westwand der Versuchshäuser aus Beckum

Versuchsauswertung

a	Zur vollständigen Karbontisierung erforderliche Menge an CO_2
a_t	Porenstrukturfaktor
$a_{t,abs}$	Porenstrukturfaktor der Absorption
$a_{t,diff}$	Porenstrukturfaktor der Diffusion
a_i, b_i	Regressionskoeffizienten
A	Wasseraufnahmekoeffizient
A_{wt}	Wasseraufnahmekoeffizient der Wassereindringprüfung
\bar{b}	Rückkarbonatisierungskonstante

B	Wassereindringkoeffizient
c	Dicke der Betondeckung
c_i	Gaskonzentration im Gasraum i
c_1, c_2	Regressionskoeffizienten der Korrelation D_{CO_2} mit ISA_{10}
d	Wanddicke
d_i	effektiver Moleküldurchmesser
$d_{i,j}$	effektiver Moleküldurchmesser der Diffusion von Gas i durch Gas j
D	Diffusionskoeffizient
D_{CO_2}	CO_2 -Diffusionskoeffizient
D_G	Diffusionskoeffizient der Gas-Diffusion
D_K	Diffusionskoeffizient der Knudsen-Diffusion
$D_{\bar{U}}$	Diffusionskoeffizient des Übergangsbereiches
dc	differentieller Konzentrationsunterschied
dx	differentielles Wegelement
f_k	Faktor der das mittlere Verhältnis von $x_{C,95}$ zu x_C berücksichtigt
F	Fläche
g	Erdbeschleunigung
g_{CO_2}	diffundierte CO_2 -Menge
$h(t)$	Saughöhe zur Zeit t
H	maximale Steighöhe der kapillaren Wasseraufnahme
ISA_i	Meßwert des ISA-Tests zum Zeitpunkt $t_s = i$
k	Boltzmann Konstante
k_1-k_3	physikalische Konstanten der kapillaren Wasseraufnahme
$K(r)$	Vom Porenradius abhängiger Parameter der Diffusion
$K(r) \cdot \epsilon_{diff}$	Diffusionsprodukt der Porenradienverteilung
L	Bauteildicke
L_p	Porenlänge
m	atomare bzw. molekulare Masse
M	molare Masse
N_A	Avogadro Konstante
O_{abs}	innere Oberfläche der kapillar wirksamen Poren
O_{diff}	innere Oberfläche der diffundierbaren Poren
p	Gesamtdruck
p_0	Anfangswert des Gesamtdrucks
p_k	Kapillardruck
$P(r)$	Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung

r	Porenradius
r_{abs}	maßgebender Porenradius der kapillaren Wasseraufnahme
r_{diff}	maßgebender Porenradius der Diffusion
$r_{h,abs}$	hydraulischer Porenradius der kapillar wirksamen Poren
$r_{h,diff}$	hydraulischer Porenradius der diffundierbaren Poren
r_{max}	größter füllbarer Radius der Quecksilberdruckporosimetrie
r_{min}	kleinster füllbarer Radius der Quecksilberdruckporosimetrie
r_g	gewichteter mittlerer Fraktilradius
r_q	Fraktilradius (q-% des Porenvolumens entfallen auf Radien $< r_q$)
R	spezielle Gaskonstante
R_k	Krümmungsradius des Meniskus
R_M	universelle Gaskonstante
s	Standardabweichung
t	Betonalter
T	Kelvin-Temperatur
T_0	Ausgangswert der Kelvin-Temperatur
v	Variationskoeffizient
V_{ges}	Gesamtvariationskoeffizient
V_m	Variationskoeffizient des Meßverfahrens
V_b	Variationskoeffizient des Betons
x	Koordinate in Transportrichtung
$x_c(t)$	Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt t nach Karbonatisierungsbeginn
\bar{x}_c	mittlere Karbonatisierungstiefe
$x_{c,max}$	maximale Karbonatisierungstiefe
$x_{c\infty}$	Endkarbonatisierungstiefe
$x_{c,95}$	95%-Fraktilwert der Karbonatisierungstiefe
$x_{c\infty,95}$	95%-Fraktilwert der Endkarbonatisierungstiefe

Griechische Buchstaben

Δc	Konzentrationsgefälle der diffundierenden Gasart
Δg_i	Gewicht des bis zum Zeitpunkt t_i eingedrungenen Wassers
Δm	Gewichtszunahme der Probe
Δt	Zeitspanne für die die Gewichtszunahme festgestellt wurde
Δt_s	Ablesedauer beim ISA-Test
ΔV_i	Volumen der bis zum Zeitpunkt t_i eingedrungenen Wassermenge

Δx	Probendicke
$\Delta \epsilon$	Differenz zwischen ϵ_{diff} und ϵ_{abs}
ϵ	Porosität
ϵ_{abs}	kapillar wirksame Porosität
ϵ_{diff}	diffundierbare Porosität
$\epsilon_{\text{füll}}$	Durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck füllbare Porosität
ϵ_{G}	diffundierbare Porosität des Kontinuumbereiches
ϵ_{ges}	Durch Wassersättigung unter Vakuumdruck füllbare Porosität
ϵ_{gel}	Gelporosität
ϵ_{Hg}	Durch Quecksilberdruckporosimetrie ermittelbare Porosität
ϵ_{K}	diffundierbare Porosität des Molekularbereiches
ϵ_{tot}	Gesamtporosität
$\epsilon(r)$	Porenradienverteilung
η	dynamische Viskosität
$\bar{\lambda}$	mittlere freie Weglänge
μ	Diffusionswiderstand
ρ	Reindichte bzw. Gasdichte
ρ_{W}	Dichte des Wassers
ρ_{tr}	Trockenrohdichte
σ	Oberflächenspannung
ϑ	Benetzungswinkel

A. ÜBERBLICK ÜBER DIE FORSCHUNGSZIELE UND DEN FORSCHUNGSANSATZ

1. FORSCHUNGSZIEL

1.1 Baupraktischer Hintergrund

Die allgemeine Forderung (Funktion) die an ein Bauwerk gestellt wird, nämlich:

mit einer definierten Sicherheit allen äußeren Einwirkungen während der Erstellung und Nutzung, ohne Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit, über den Zeitraum der vorgesehenen Nutzungsdauer, standzuhalten,

schließt auch den Anspruch nach Dauerhaftigkeit ein. Ein dauerhaftes Betonbauwerk bedingt:

1. Die sachgerechte Baustoffauswahl und konstruktive Gestaltung des Bauteiles.
2. Die sachgerechte Qualitätssicherung während der Ausführung.
3. Eine ausreichende Überwachung und Wartung des Bauwerkes während seiner Nutzung.

Quantifizierungen der oben genannten Kriterien für das dauerhafte Bauen mit Beton beruhen i. w. auf Erfahrung, auch wenn die Forschung hierzu wesentliche Beiträge liefern konnte. Schadensfälle führten zu erhöhten Anforderungen im Bereich der zuvor genannten Punkte, die sich in der DIN 1045(7.88) und in anderen bautechnischen Regeln niederschlagen. Es ist zu erwarten, daß die Einhaltung dieser Kriterien zu Betonbauwerken mit verbesserter Dauerhaftigkeit gegenüber älteren Ausführungen führen wird. Aber auch dann muß man sich darüber im klaren sein, daß es bis heute noch nicht gelungen ist, die potentielle Dauerhaftigkeit des gerade fertiggestellten Bauwerkes beispielsweise bei dessen Abnahme vorherzusagen. Ebenso gelingt es nicht - je-

denfalls nicht ohne zerstörende Prüfung - die residuale Dauerhaftigkeit des älteren Bauwerkes abzuschätzen.

Hier setzt die Arbeit an. Es soll ein Prognosemodell zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen an der Witterung entwickelt werden. Die Anwendung des Modells im konkreten Fall bedingt die in-situ-Messung der Dichtigkeit des Betons der Betondeckung und anderer die Dauerhaftigkeit bestimmender Größen auf zerstörungsfreie Weise. Dies ist nötig, um die Modellparameter bauwerksspezifisch zu kalibrieren.

1.2 Anwendungsbereich und Witterungsbedingungen

Der Begriff Dauerhaftigkeit kann hier nicht in seiner ganzen Komplexität behandelt werden. Die Dauerhaftigkeit kann durch eine Vielzahl von Einwirkungen (Angriffe) gemindert werden (siehe z. B. [A1]). Hier wird deshalb nur der Hauptschadensfall näher betrachtet - der Verlust der Dauerhaftigkeit infolge der Korrosion der oberflächennahen Bewehrung an der witterungsbeaufschlagten Bauteiloberfläche (Außenbauteil).

Dieser Schadensfall tritt ein, wenn die Stahloberfläche durch Karbonatisierung depassiviert wurde und die Voraussetzungen elektrochemischer Korrosion vorliegen (siehe [A2 - A6]). Damit ist Dauerhaftigkeit hier als jene Zeitspanne definiert, innerhalb der Karbonatisierungsspitzen die Bewehrungsstäbe mit minimaler Betondeckung erreichen. Die Dicke und Dichtigkeit des Betons der Betondeckung bestimmen daher die Dauerhaftigkeit.

Die Intensität der Karbonatisierungsbeanspruchung unter den Randbedingungen der Witterung hängt ab von :

- den Bauwerksbedingungen
 - Innenraum (abhängig von der Bauwerksnutzung)
 - Im Freien unter Dach
 - Im Freien ungeschützt

■ dem Bauwerksstandort (Witterungsbedingungen an sich)

- Meeresklima
- Landklima
- Stadtklima
- Industrieklima

Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Witterungsbedingungen der Region Braunschweig betrachtet. Von den Bauwerksbedingungen werden die Fälle "im Freien ungeschützt" und "Innenraum 20/65" näher untersucht (siehe Bild A1). Diese stellen Extreme der natürlichen Beanspruchung dar. Darüberhinaus soll untersucht werden, ob durch eine künstliche Bewitterung eine zeitgeraffte Beeinträchtigung entsteht, die derjenigen natürlicher Beanspruchung gleichwertig ist. Die beanspruchungsüberhöhende Simulation des natürlichen Wetters erfolgt dabei durch Aufbringung von Beregnungs- und Trocknungszyklen unterschiedlicher Dauer.

1.3 Forschungsziele

Das Forschungsvorhaben setzt sich zum Ziel, die Porosität und Dichtigkeit der Betondeckungsschicht in Abhängigkeit vom Betonalter (Expositionsdauer) und den Umgebungsbedingungen zu studieren. Die Untersuchungen sollen an Wänden, die im Labor und im Freien lagern, und an Bauwerken erfolgen. Dabei kommen der Entwicklung von Prüfmethoden und Kennwerten zur Charakterisierung der Porenradialverteilung sowie der Ergebniskorrelation zwischen Porosität und Dichtigkeit größere Bedeutung zu, als dem Studium des Einflusses betontechnologischer Parameter auf die Dauerhaftigkeit. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen soll dann ein Modell zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit entwickelt werden. Deren Eignung ist zu verifizieren (näheres siehe Berichtsteil C).

2. VORGEHEN

Umfassende, hier nicht wiedergegebene Vorüberlegungen ergaben, daß das angestrebte Dauerhaftigkeitsmodell folgende Elemente enthalten muß:

1. Ein zerstörungsfrei direkt auf Bauteiloberflächen anwendbares Meßverfahren zur Feststellung der Dichtigkeit des oberflächennahen Betons (hier: initial surface absorption test (ISAT), mit dem der sogenannte ISA-Wert gemessen werden kann, näheres siehe Berichtsteil B).
2. Die Kenntnis der Dicke der Betondeckung. Entsprechende Messverfahren zur nachträglichen Feststellung der Dicke der Betondeckung sind bekannt und nicht Gegenstand dieses Antrages.
3. Eine auf Grund der hier durchgeführten Messungen verifizierte Beziehung zwischen den Kennwerten des Porensystems und den Transportkoeffizienten sowie eine Beziehung zwischen dem Diffusions- und Absorptionskoeffizienten.
4. Ein Karbonatisierungsgesetz. Dabei wird auf das Karbonatisierungsgesetz von Schießl [A3] zurückgegriffen (nähere Erläuterungen dazu, einschließlich einer Beurteilung der Anwendungsgrenzen, sind Berichtsteil C zu entnehmen).
5. Ein Beurteilungskriterium. Für den gesamten Zeitraum der Nutzungsdauer muß gelten: Dicke der Betondeckung $>$ Karbonatisierungstiefe. Zwecks Einschränkung der Eintretenswahrscheinlichkeit des Verlustes der Dauerhaftigkeit, sind Angaben zur Streuung der Karbonatisierungstiefe und Dicke der Betondeckung erforderlich.

Das Ergebnis der Prognose ist die Angabe des Zeitpunktes zudem der Beton nicht mehr in der Lage ist die Passivierung der Bewehrungsoberfläche zu gewährleisten (Verlust der Betoneigenschaft pH-Wert $>$ 12,5 in unmittelbarer Umgebung von Teilen der Bewehrungsoberfläche).

Die hier durchgeführten Versuche und Ableitungen dienen in erster Linie der Klärung von Teilelement 3. Versuchsmäßig erfaßt wird dazu ein Teil derjenigen Parameter die den Karbonatisierungsfortschritt im ungerissenen Beton bestimmen. Der Karbonatisierungsfortschritt ist eine Funktion von:

- der Menge an CO_2 -bindbaren Substanzen und der Größe der inneren Oberfläche auf die sie sich verteilen
- der Reaktionskinetik und Rückdiffusion von Alkalien aus dem Betoninneren zur karbonatisierten Zone
- dem Porensystem (Porosität, Porenradienverteilung, Porenstruktur) als den über die Zugänglichkeit für Fluide bestimmenden Faktor (die dabei zu beachtende Bedeutung der Betonfeuchte wird im Berichtsteil C ausführlich erläutert)
- den durch die Witterungsbedingungen festgelegten äußeren Randbedingungen.

Zur Bestimmung der Porosität und Dichtigkeit werden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Eigenschaften der kapillaren Wasserleitung in Labor- und Bauwerksversuchen
- Bestimmung der CO_2 -Diffusionseigenschaften
- Bestimmung der Porenradienverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

Die übrigen Parameter des Karbonatisierungsfortschrittes sind entweder bekannt (Witterungsbedingungen), lassen sich aus der Betonzusammensetzung abschätzen (CO_2 -bindbare Substanz) oder gehen nur in untergeordneter Bedeutung in das Karbonatisierungsgesetz ein (Reaktionskinetik).

Die Ableitungen über die Zusammenhänge zwischen Porensystem und Dichtigkeit gehen von der Arbeitshypothese aus, daß die Größe des Transportkoeffizienten durch die Geometrie des Porensystems bestimmt ist. Dies kann durch die Versuchsergebnisse verifiziert werden. Weiterhin wird überprüft, in wiefern für ein und dasselbe Porensystem die Koeffizienten verschiedener Transportarten miteinander in Beziehung stehen. Mit Hilfe einer solchen Beziehung kann die maßgebende Betoneigenschaft Diffusionskoeffizient durch den zerstörungsfrei direkt am Bauteil meßbaren ISA-Wert substituiert werden.

Im Berichtsteil C wird dies detailliert ausgeführt und gezeigt, daß die Vorhersage der Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit (Betonalter) und

des ISA-Wertes möglich ist. Entsprechend der Definition von Abschnitt A1.2 sind dann alle die Bauteile dauerhaft, für die gilt:

$$\frac{\max. x_c (t < \text{Nutzungsdauer}; \text{ISA})}{\min. c} \leq 1$$

mit:

$\min. c > 0$.

Weitere Erläuterungen zu den Versuchszielen sind sofern sie in Zusammenhang mit der Versuchsdurchführung stehen dem Berichtsteil B und sofern sie die Ableitungen des Dauerhaftigkeitsmodells betreffen dem ersten Abschnitt von Berichtsteil C zu entnehmen.

3. GLIEDERUNG DES BERICHTSBANDES

Insgesamt setzt sich der Abschlußbericht aus den vier Teilen A - D mit folgendem Inhalt zusammen:

A. Überblick über die Forschungsziele

- Einleitung
- Definitionen
- Aufgabenstellung
- Lösungsansatz
- Ziele
- Kurzzusammenfassung der Ergebnisse

B. Versuchsprogramm und Versuchstechnik

- Versuchskörper
- Versuchsmethoden
- Versuchsplanung
- Eignung der Versuchstechniken; Materialstreuung

C. Theoretische Voraussetzungen und Methoden der Versuchsauswertung

- Forschungsziele
- Makromodell Betongefüge
- Transportvorgänge in Betonporen, Dichtigkeit
- Methoden der Auswertung von Porenradienverteilungen
- Einflüsse von Hydratation und Karbonatisierung sowie betontechnologischer Parameter auf die Porenradienverteilung von Beton
- Porenmodell und Stofftransport (Korrelation Dichtigkeit - Porosität)
- Dauerhaftigkeitsmodell
 - Beurteilungskriterium
 - Karbonatisierung
 - Karbonatisierung - Porosität - gemessene Dichtigkeit
 - Statistische Angaben zur Betondeckung und Karbonatisierung
 - Bemessungsmodell der Dauerhaftigkeit

D. Versuchsergebnisse und deren Interpretation

- Festlegung des auszuwertenden Versuchsumfangs
- Zeitliche Entwicklung der Porosität und Porenradienverteilung
- Zeitliche Entwicklung der Transportkoeffizienten
- Korrelation Porosität - Dichtigkeit
- Verifikation der Ableitungen von Berichtsteil C
- Anwendung des Dauerhaftigkeitsmodells

In den einzelnen Berichtsteilen befinden sich die zugehörigen Literaturverzeichnisse, Tabellen und Bilder geschlossen am jeweiligen Ende des Textteiles. Die Erklärungen aller im Bericht verwendeter Formelzeichen ist dem Teil A vorangestellt.

Der Abschlußbericht enthält die vollständige Angabe aller Versuchsergebnisse und der zu ihrer Interpretation erforderlichen Ableitungen.

4. ÜBERBLICK ÜBER DIE WESENTLICHEN ERGEBNISSE

Die Versuche zur Beschreibung der

- Porosität und Porenradienverteilung
- CO₂-Diffusion
- kapillaren Wasseraufnahme
- Absorptionsdichtigkeit des Betons der Betondeckung (ISA-Verfahren, zerstörungsfrei, unmittelbar auf der Bauteiloberfläche)

wurden an Versuchswänden (siehe Bild A2) sowie an den 25 Jahre alten Versuchshäusern des ZEM-Labors in Beckum durchgeführt.

Die Auswertung der Porenradienverteilungen erfolgte u.a. nach physikalischen Gesichtspunkten. Es wurden Kennwerte abgeleitet die mit den Transportvorgängen zusammenhängen. Die Kennwerte ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ sind jene Porenräume die für Absorption und Diffusion zugänglich sind. Darüberhinaus werden diese Transporte von den diesen Teilporositäten zugehörigen hydraulischen Radien $r_{h,\text{abs}}$ und $r_{h,\text{diff}}$ beeinflusst. Der Einfluß betontechnologischer Parameter wie Lagerungsbedingung, Nachbehandlung, Betonzusammensetzung sowie die versuchsvorbereitende Art der Probentrocknung auf die zeitliche Entwicklung der genannten Kennwerte wurde eingehend untersucht. Veränderungen der Porosität und Porenradienverteilung konnten den jeweils herrschenden Hydratations- und Karbonatisierungsbedingungen zugeordnet werden.

Einzelheiten dazu sind dem Berichtsteil D zu entnehmen. Die Bilder A3, A4, A5 und A6 zeigen die zeitliche Entwicklung der transportrelevanten Teilporositäten der Versuchswände (Proben wurden im Vakuum getrocknet). Entsprechende Auswertungen wurden auch für den CO₂-Diffusionskoeffizienten (Bild A7) und die Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme (Bild A8) durchgeführt.

Zwischen den Kennwerten der Porenradienverteilung und dem Transportkoeffizienten wurde auf Basis eines idealisierenden Porenmodells (Kreiszyylinder) eine physikalisch sinnvolle Beziehung hergestellt. Der Transportkoeffizient ist dem Produkt der zugehörigen Teilporosität und einem Faktor in den der

hydraulische Radius eingeht proportional. Bild A9 zeigt beispielhaft die Korrelation zwischen dem ISA_{10} -Wert und $\epsilon_{abs} \cdot \sqrt{2 r_{h,abs}}$, dem Absorptionsprodukt.

Darüberhinaus ergab sich eine Korrelation zwischen den beiden Teilporositäten ϵ_{abs} und ϵ_{diff} (Bilder A10 und A11) und dem Absorptions- und dem Diffusionsprodukt. Die letztere erwies sich als im wesentlichen unabhängig von den zuvor aufgezählten betontechnologischen Parametern und der Wandtiefe.

Auf der Grundlage dieser Korrelationen ergibt sich die Möglichkeit eine Abhängigkeit zwischen Diffusion und Absorption herzustellen. Mißt man letztere als ISA_{10} -Wert, so kann mit der Beziehung

$$D_{CO_2} = f(ISA_{10})$$

der Karbonatisierungsfortschritt des untersuchten Betons abgeschätzt und eine Vorhersage der Dauerhaftigkeit vorgenommen werden (siehe Berichtsteile C und D).

Die auf dieser Grundlage durchgeführten Prognosen für die ca. 25 Jahre alten Versuchshäuser aus Beckum stimmen mit den gemessenen Karbonatisierungstiefen brauchbar überein [A9]. Das hier entwickelte Vorhersagemodell ist als ein erster Schritt zu bezeichnen, der noch der Weiterentwicklung bedarf.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [A1] Sereda, P.J.; Litvan, G.G. (editors): Durability of building materials and components. Proceedings of the First International Conference, Ottawa, Canada, 21.-23. August 1978.
- [A2] Schießl, P.: Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. Heft 370 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1986.
- [A3] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Heft 255 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- [A4] Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under normal Outdoor Exposure. Hannover, FRG, 26.-29. March 1984.
- [A5] Schießl, P. (editor): Corrosion of Steel in Concrete. London, 1988.
- [A6] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Report F 04, 1982.
- [A7] Rehm, G.: Korrosion von Stahl in Beton - Ein gelöstes Problem? Vortrag auf dem Deutschen Betontag, Berlin, 23.-25. April 1987.
- [A8] Gertis, K.; Kießl, K.; Werner, H.; Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. Heft 258 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- [A9] Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Evaluation of On-site Conditions and Durability of Concrete Panels Exposed to Weather. IABSE-Symposium Durability of Structures, Lisbon, 6.-8. Sep. 1989.

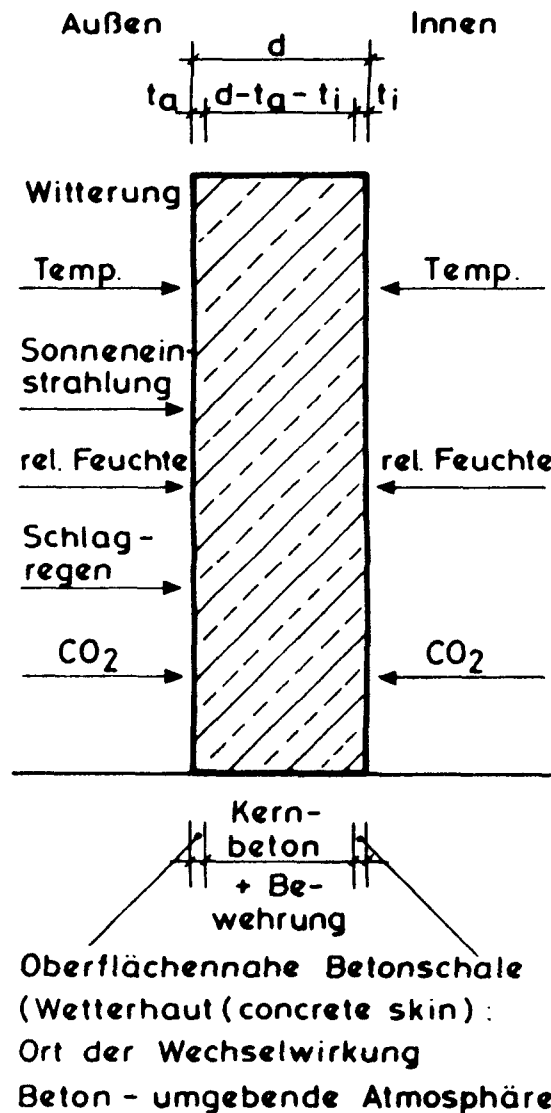
ABBILDUNGEN

TEIL A

Bauteil

Einwirkungen des Bauwerksstandortes

Künstl. Bewitterung



Außen

Stadtklima

Wettersituation des Großraumes Braunschweig

$$\bar{T} = 8.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{\varphi} = 85 \%$$

$$\bar{R} = 600 - 800 \text{ mm}$$

$$\bar{c}_{CO_2} = 0.03 \%$$

(Jahresmittelwerte langjähriger Beobachtungen)

Innen

Laborklima

$$\bar{T} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = \text{const.}$$

$$\bar{\varphi} = 65 \% = \text{const.}$$

$$\bar{c}_{CO_2} = 0.03 \% = \text{const.}$$

Zyklen von Beregnung und Trocknung unterschiedlicher Dauer und Höhe (ohne Erhöhung des CO_2 Gehaltes)

hier gewählt:

Zyklus 1

10 min Beregnung

20 min Trocknung

Zyklus 2

3 min Beregnung

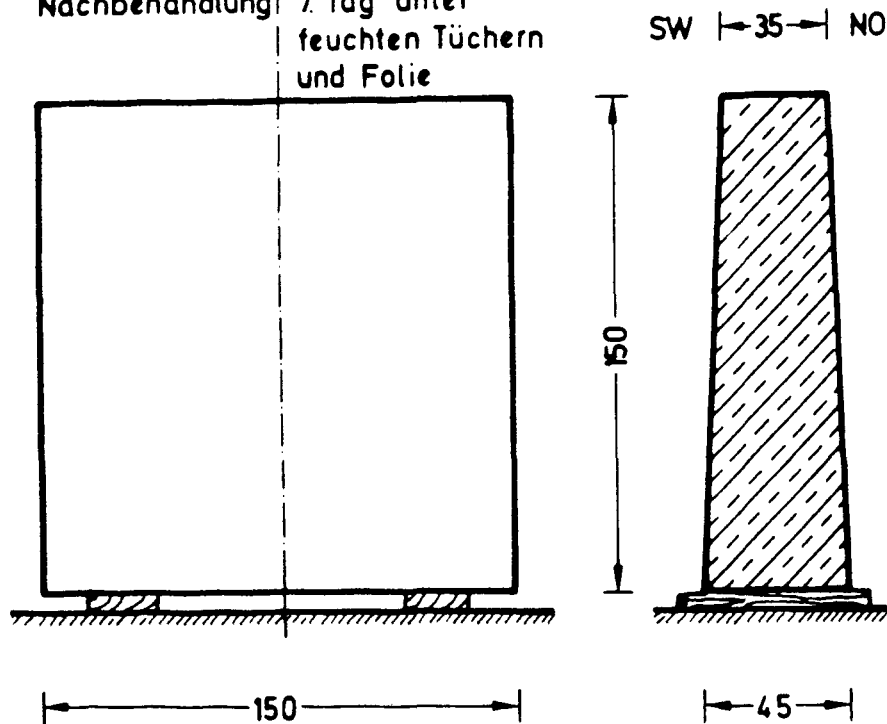
21 min Trocknung

Bild A1: Modell der berücksichtigten Witterungsbeanspruchungen.

Nachbehandlung:

erster Tag in der Schalung

keine weitere Nachbehandlung	bis zum 7. Tag unter feuchten Tüchern und Folie
---------------------------------	--



Wand	w/z Wert	Zement- gehalt	Zuschlag Geh.	Sieb- linie	Herstell- datum	Bohrkern- entnahme
		[kg/m ³]		[kg/m ³]		[Tage]
A ^L F	0,5	340	1844	B16	Nov.85	7,28,120, 400,960
B ^L F	0,7	280	1810	B16	Sep.85	7,28,90, 400,780, 1010

Bild A2: Abmessungen und Betonzusammensetzung der Versuchswände.

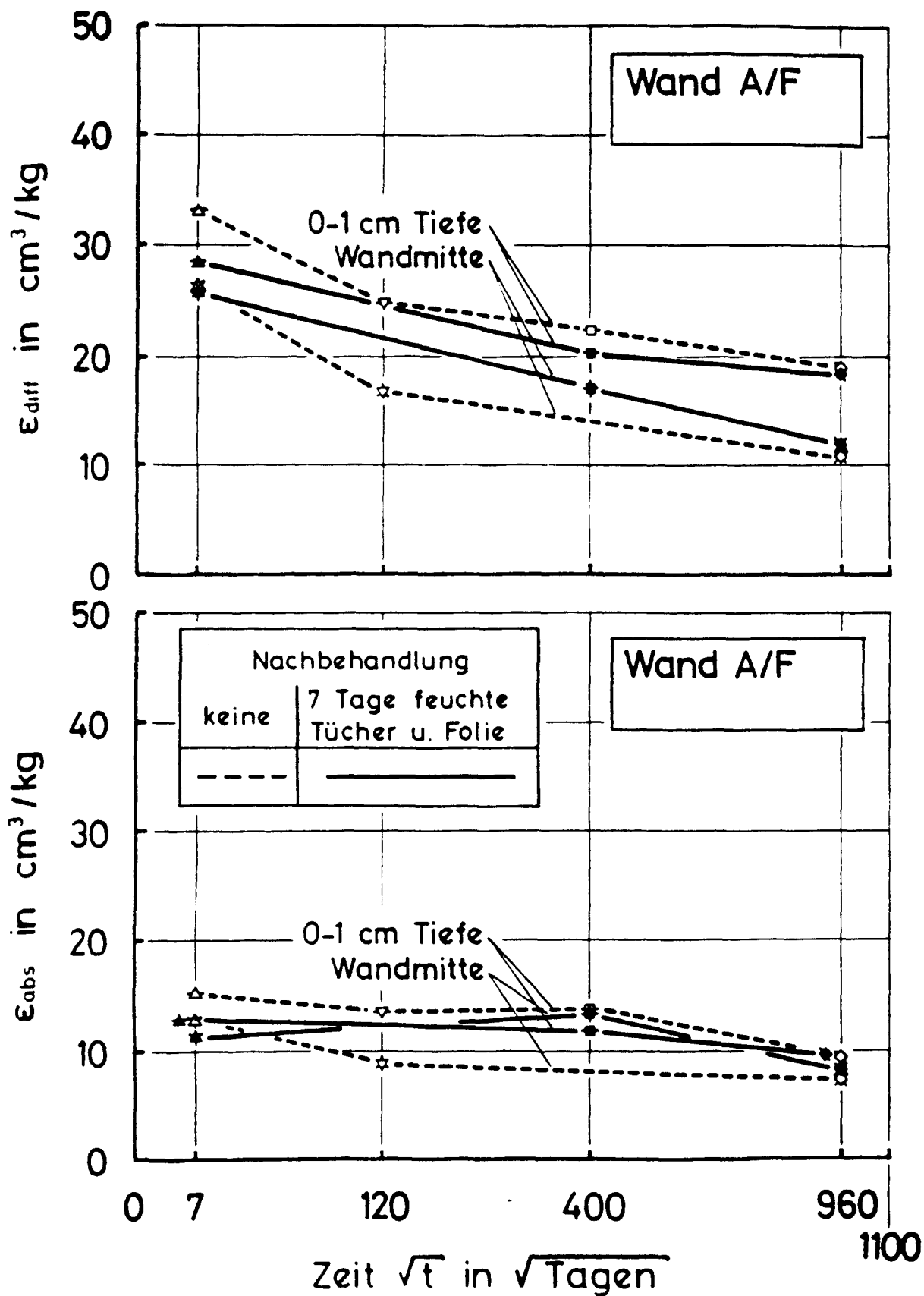


Bild A3: Zeitliche Entwicklung der Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Wandtiefen 0 - 10 mm und Wandmitte für die Wand AF.

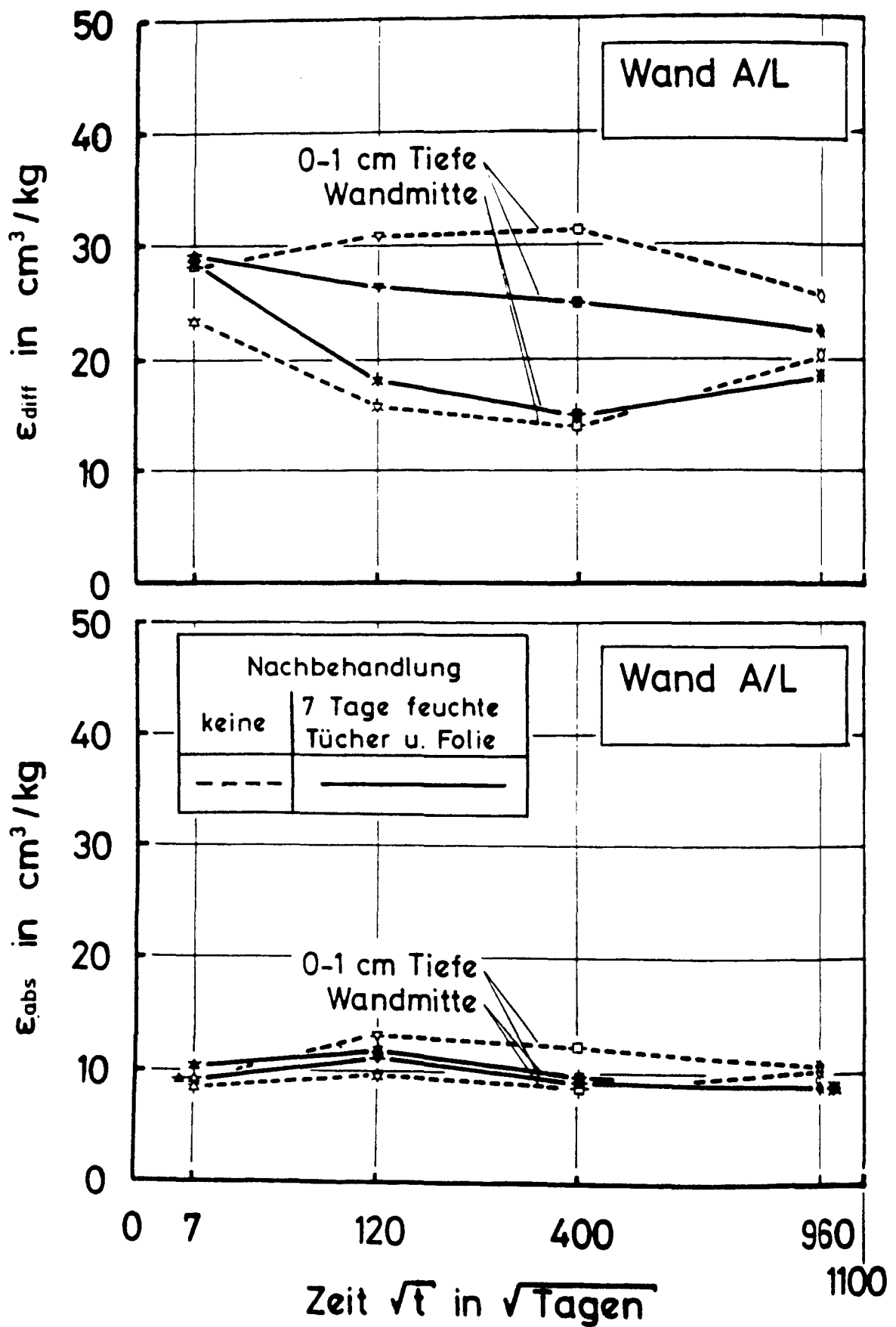


Bild A4: Zeitliche Entwicklung der Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Wandtiefen 0 - 10 mm und Wandmitte für die Wand AL.

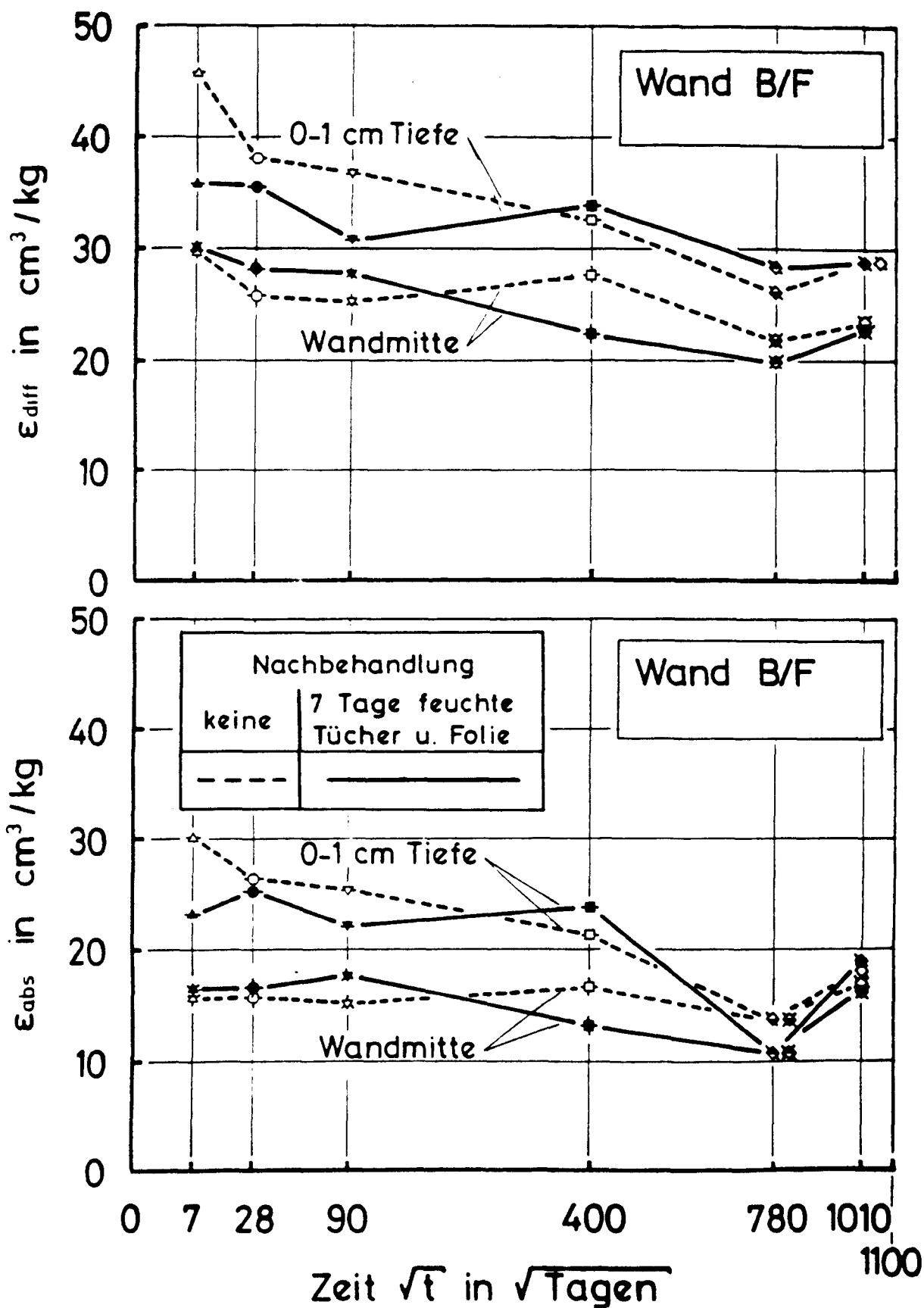


Bild A5: Zeitliche Entwicklung der Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Wandtiefen 0 - 10 mm und Wandmitte für die Wand BF.

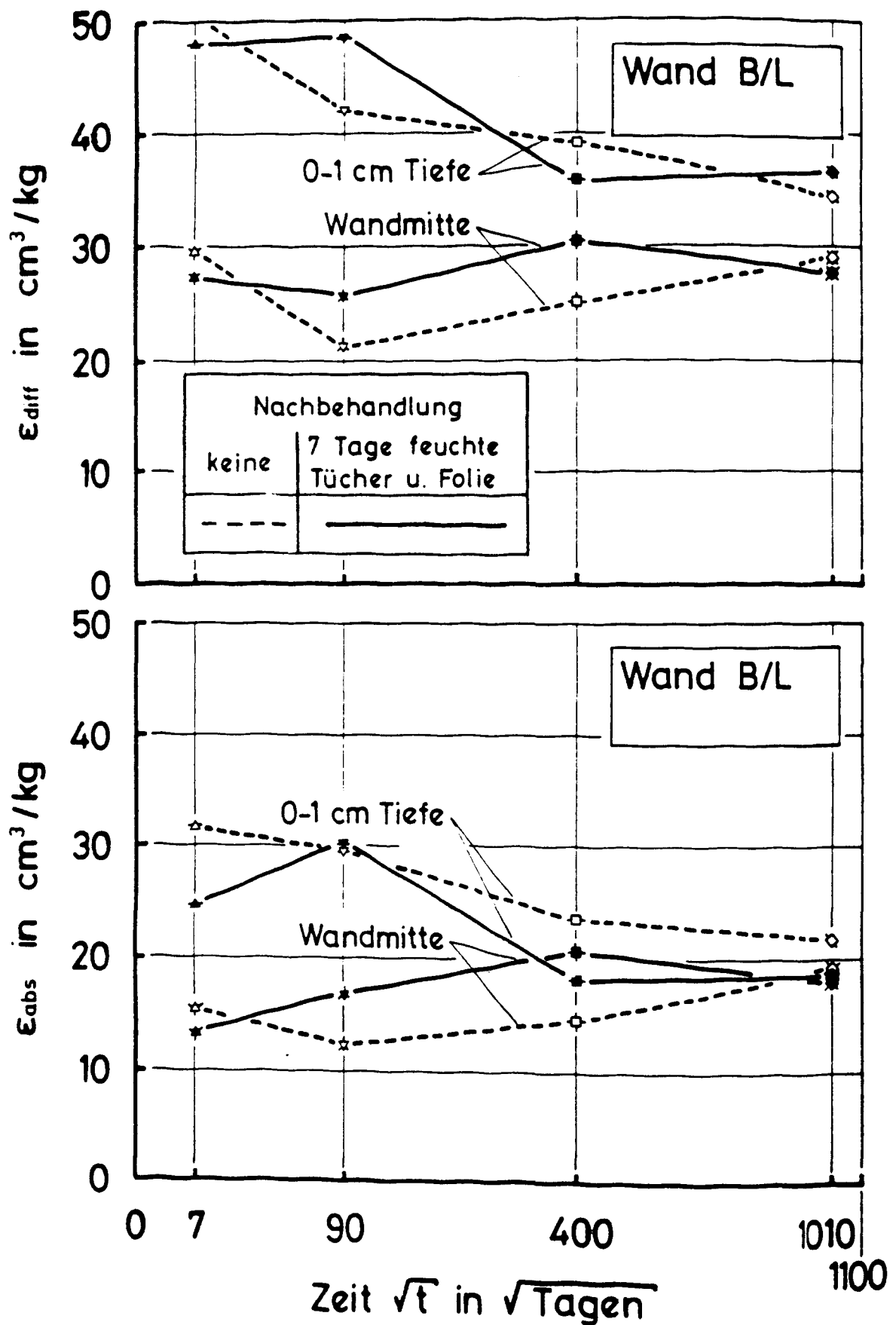


Bild A6: Zeitliche Entwicklung der Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Wandtiefen 0 - 10 mm und Wandmitte für die Wand B/L.

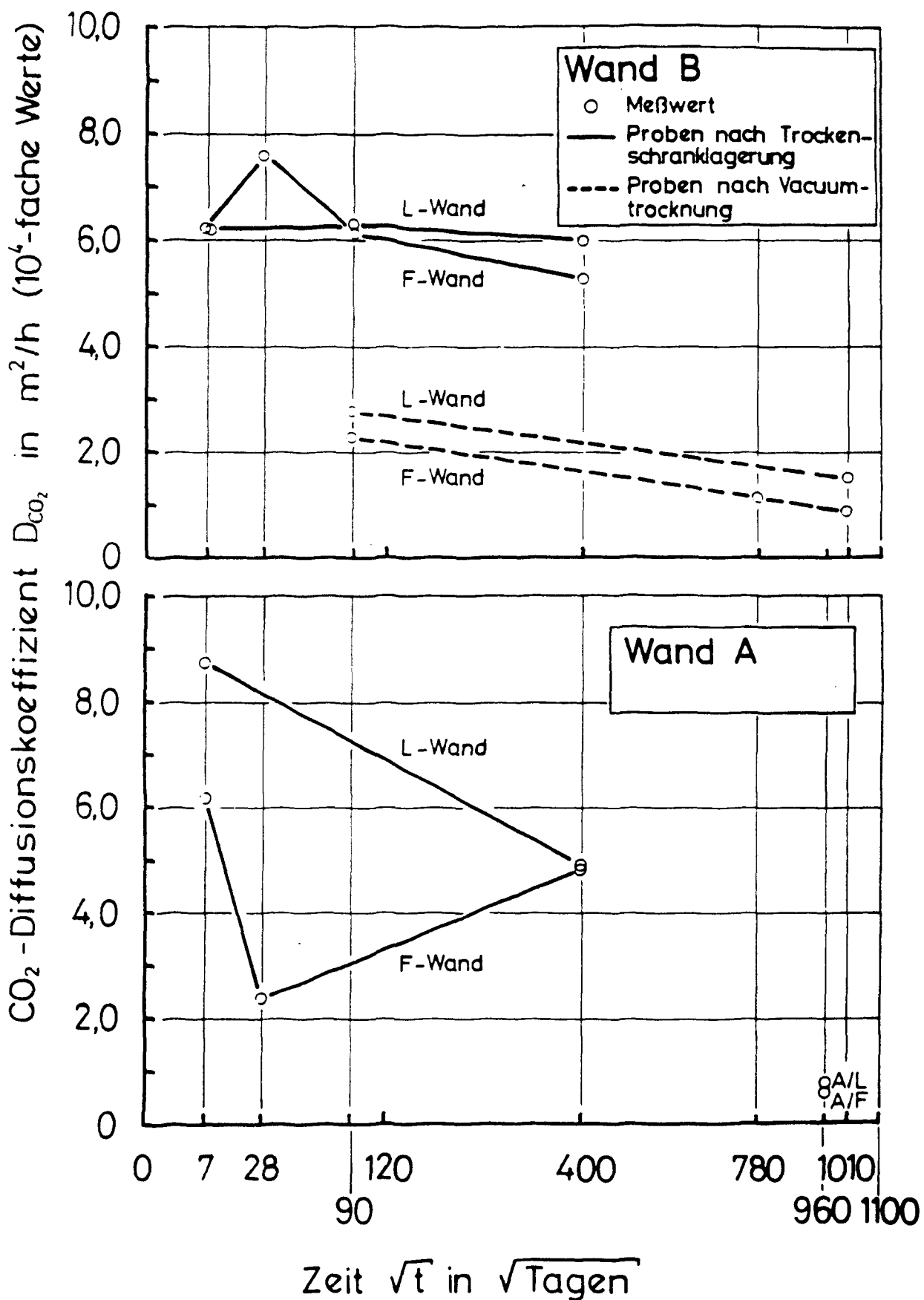


Bild A7: Zeitliche Entwicklung des CO₂-Diffusionskoeffizienten D_{CO_2} einer ca. 10 mm dicken Probe aus dem Wandinneren, in Abhängigkeit der vor Versuchsbeginn durchgeführten Trocknungsart (getrennte Darstellung für Wand A (untere Bildhälfte) und Wand B (obere Bildhälfte)).

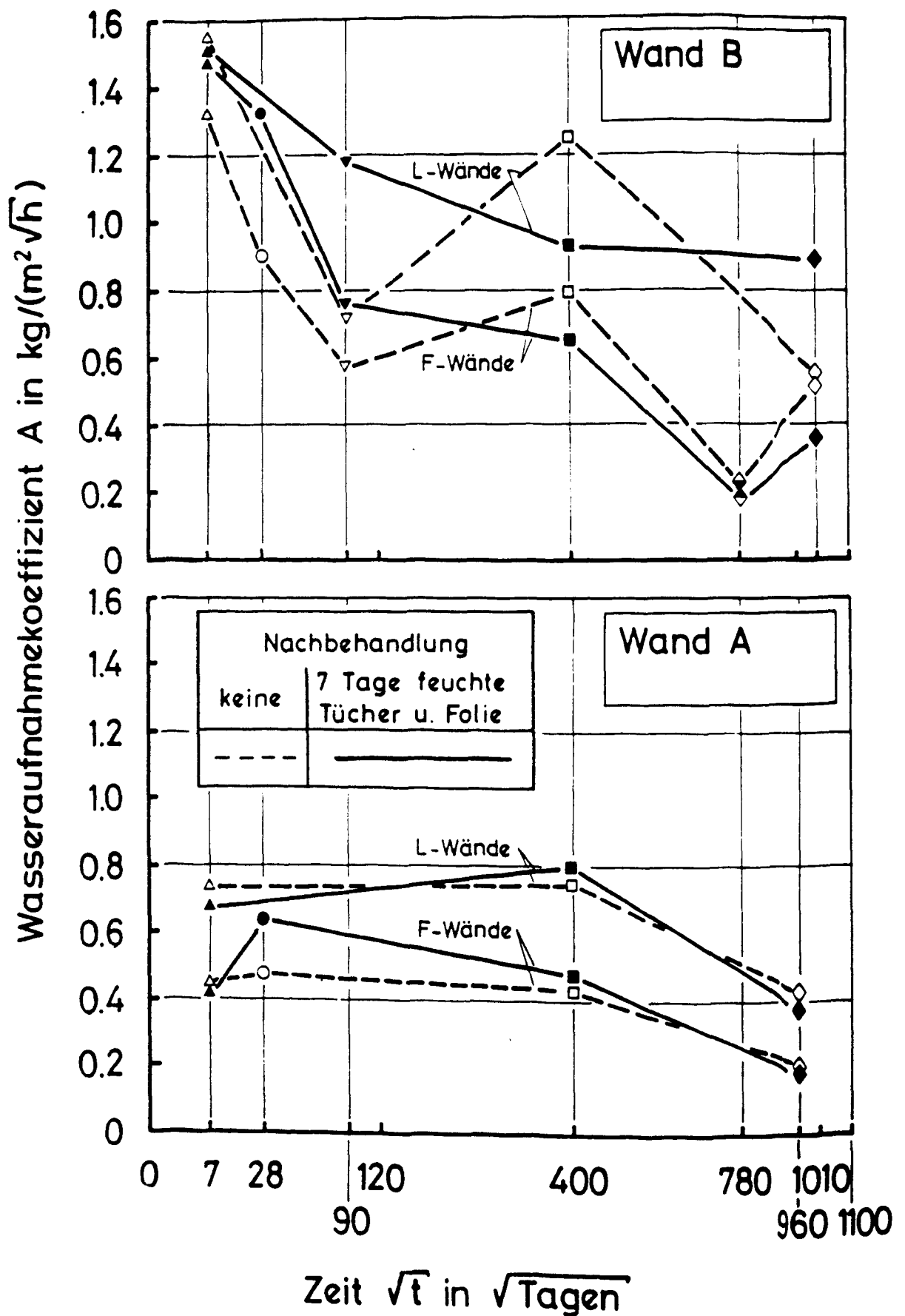


Bild A8: Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten A der 5 cm hohen Probe der oberflächennahen Betonzone (getrennte Darstellung für Wand A (untere Bildhälfte) und Wand B (obere Bildhälfte)).

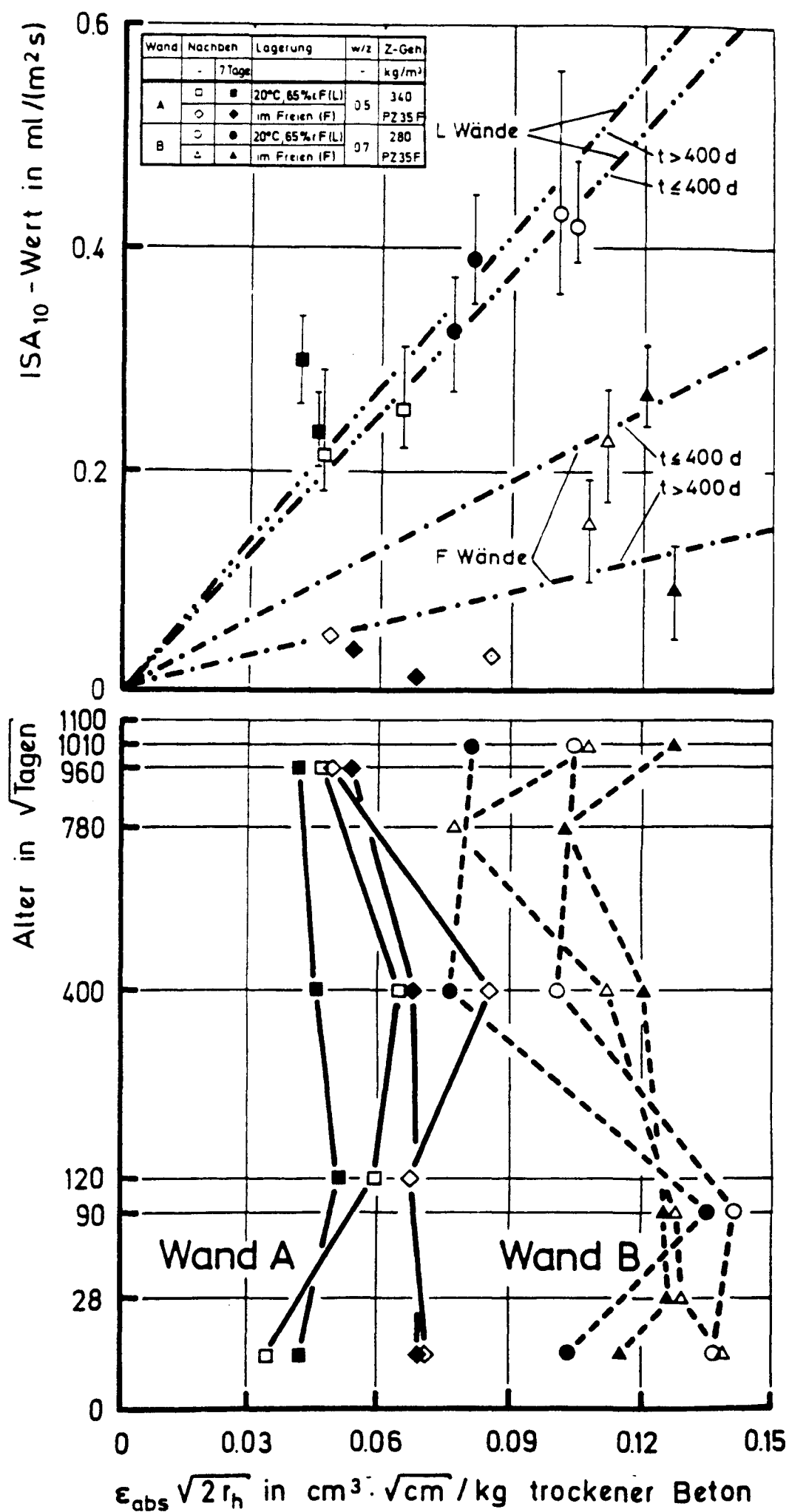


Bild A9: Korrelation der gemessenen ISA₁₀-Werte mit dem Produkt aus ϵ_{abs} und $\sqrt{r_h}$ für verschiedene Lagerungsbedingungen und Betonalter.

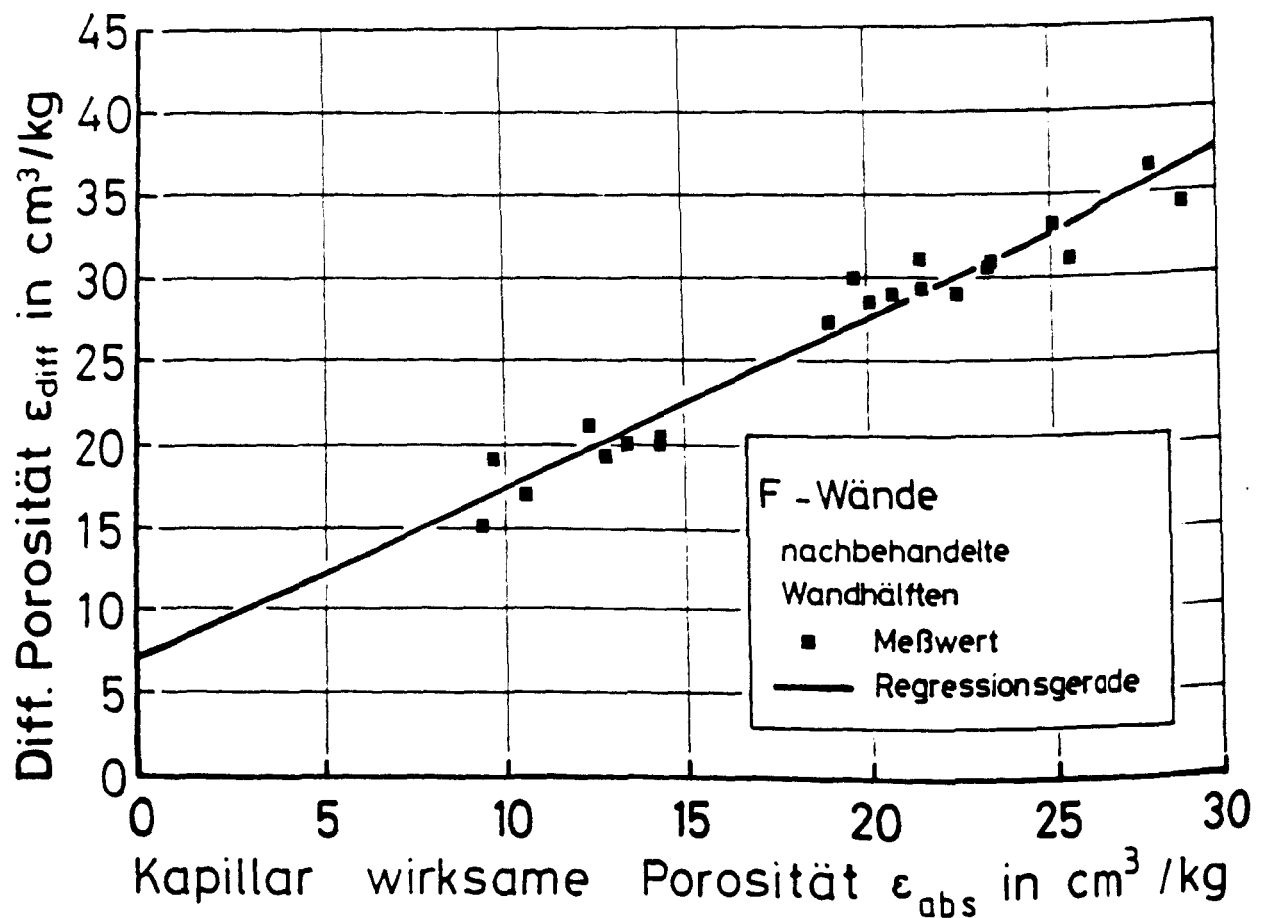
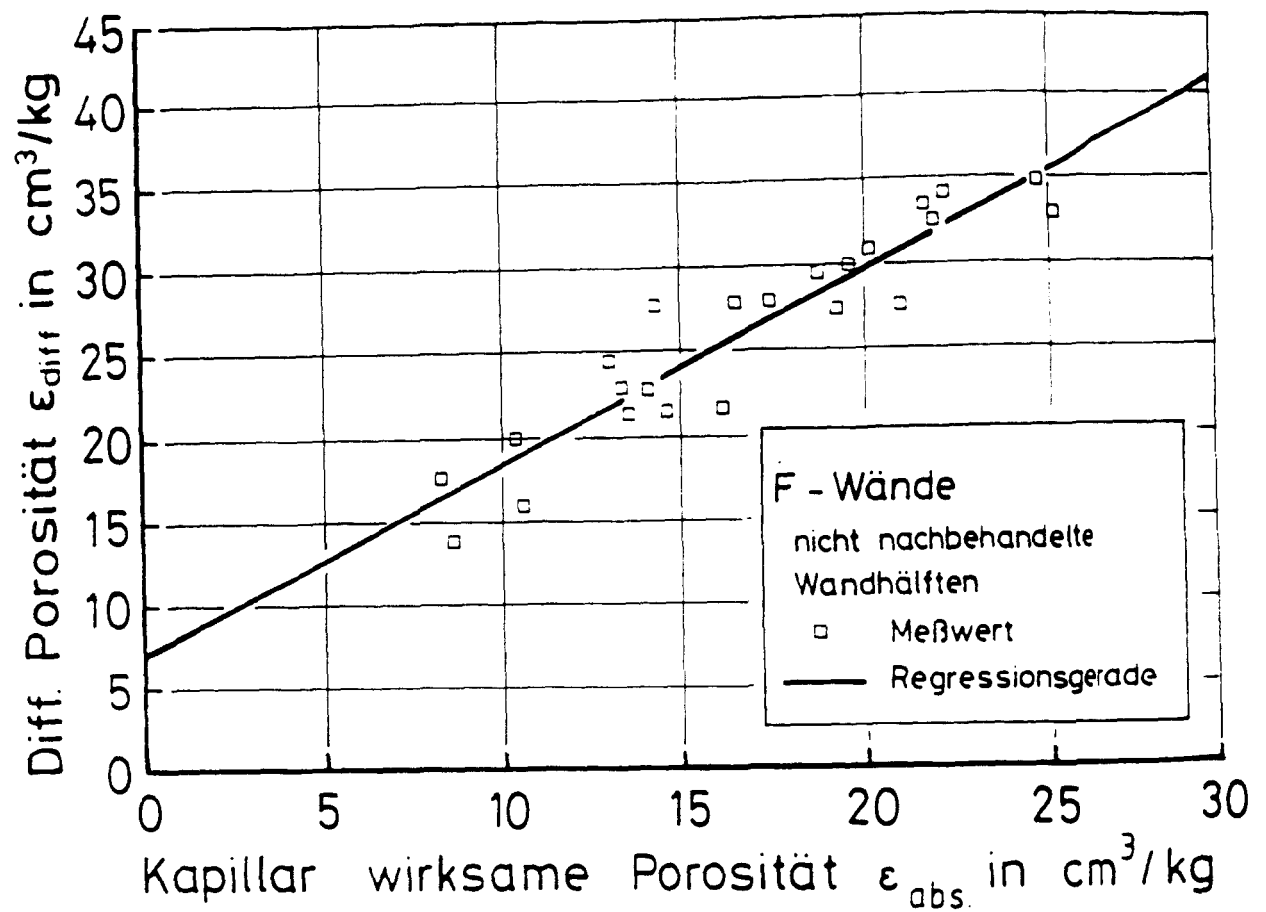


Bild A10: Korrelation zwischen ϵ_{diff} und ϵ_{abs} für mindestens 400 Tage alte Proben aus der Wandtiefe 0 - 20 mm für die im freien gelagerten Wände A und B.

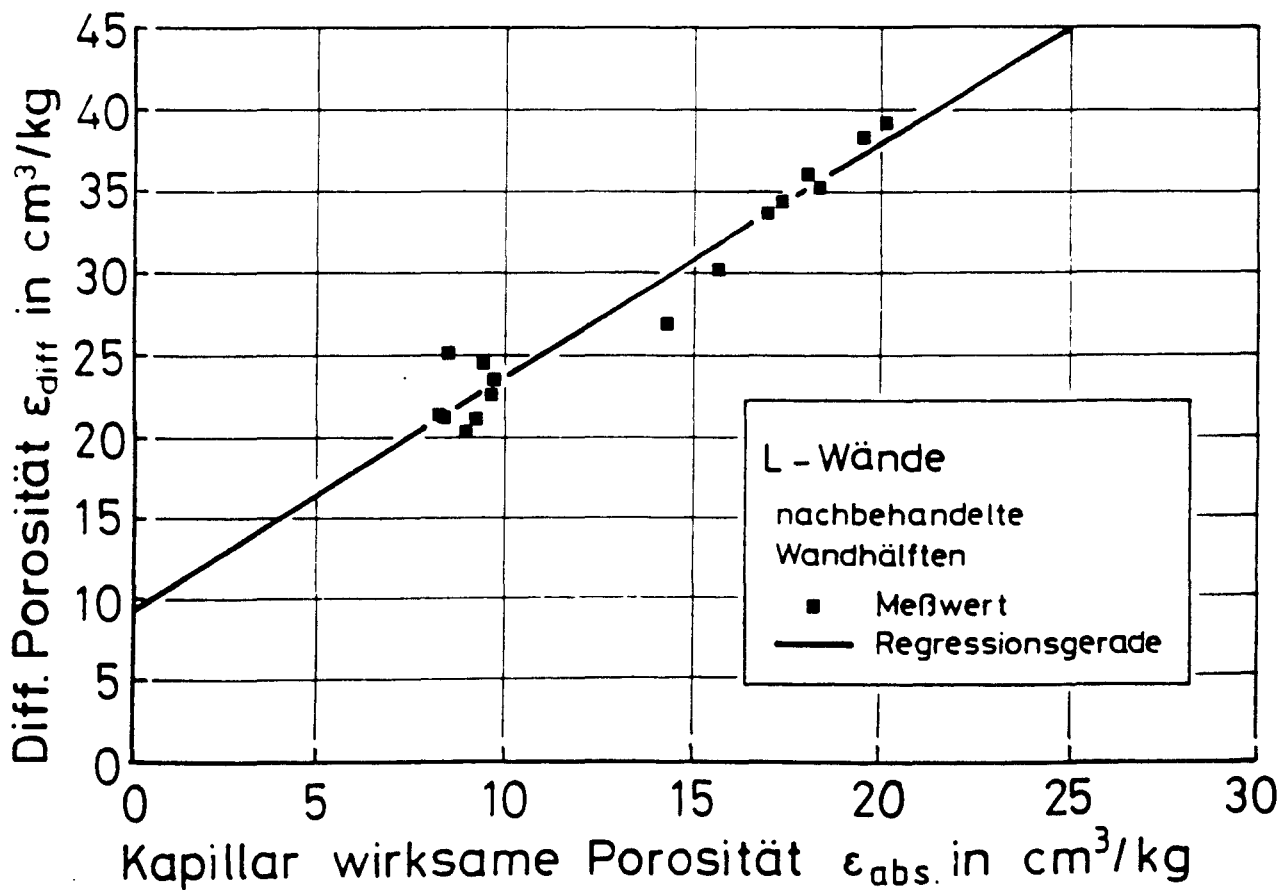
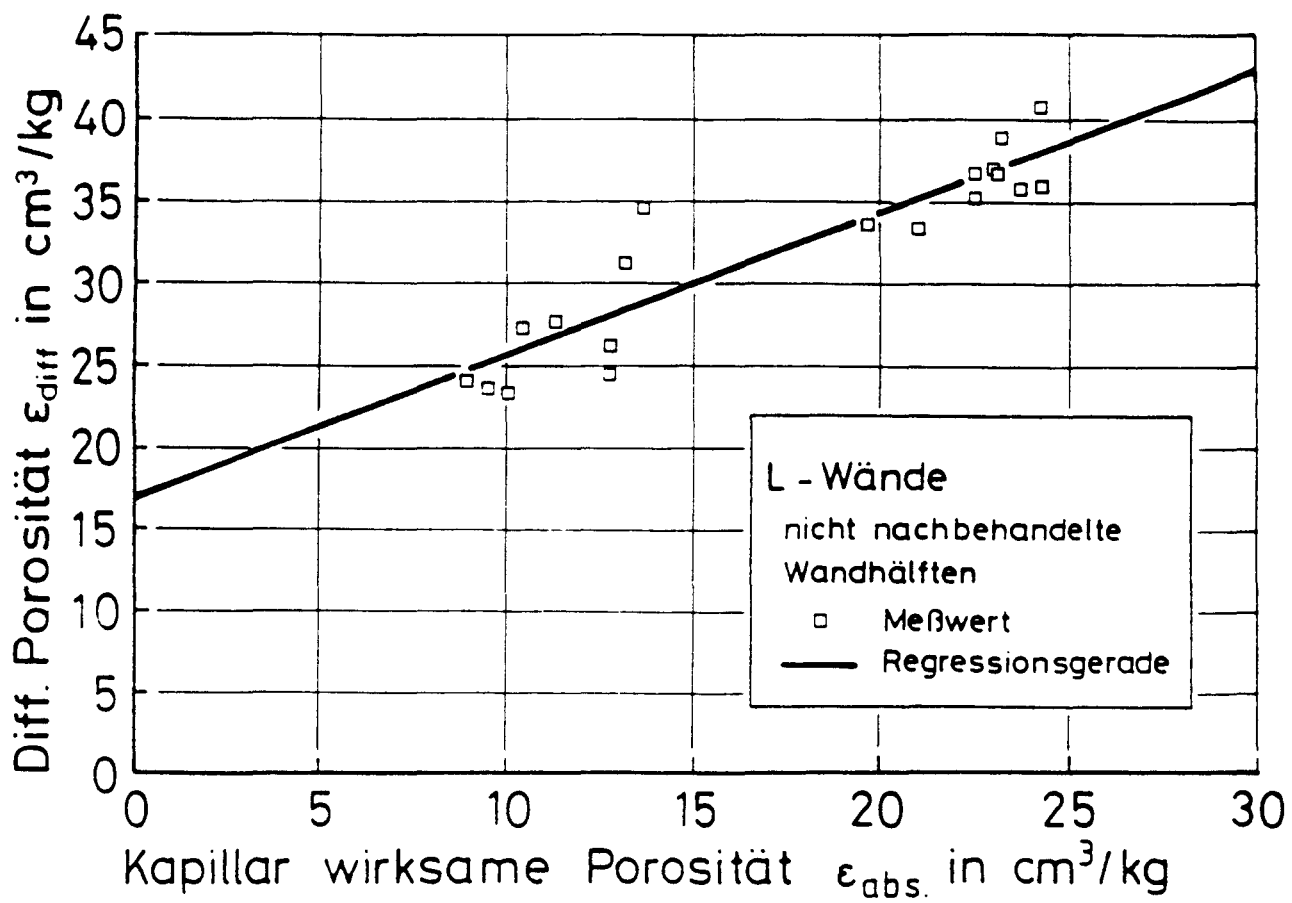


Bild A11: Korrelation zwischen ϵ_{diff} und ϵ_{abs} für mindestens 400 Tage alte Proben aus der Wandtiefe 0 - 20 mm für die im Labor gelagerten Wände A und B.

B. VERSUCHSPROGRAMM UND VERSUCHSTECHNIK

1. ÜBERBLICK

Dieser Berichtsteil enthält Angaben zu den Versuchstechniken und zur Herstellung der Versuchskörper. Die Meßgrößen sind die Porosität und Dichtigkeit der oberflächennahen Betonschicht in ihrer zeitlichen Entwicklung.

Dazu werden wandartige Versuchskörper praxisnaher Abmessungen (siehe Abschnitt B.2), unter Variation wesentlicher Parameter, wie w/z-Wert, Nachbehandlung und Lagerungsbedingungen hergestellt. Zudem werden Untersuchungen an Bauwerken durchgeführt. Die Untersuchungen umfassen:

- Laborversuche (Abschnitte B.3.2 - B.3.5 sowie B.3.7)
 - Quecksilberdruckporosimetrie
 - Vakuumsättigung
 - Thermische Analyseverfahren DTA + TG (stichprobenartig)
 - Diffusionsversuche
 - Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme
 - Zeitgeraffte Bewitterungsversuche
 - Messung der Karbonatisierungstiefe
- Bauwerksversuche zur Wasserabsorption von Betonoberflächen (Abschnitt B.3.6)
 - Wassereindringprüfung
 - ISA-Versuche

Der jeweilige Versuchsumfang ist den Prüfplänen zu entnehmen (siehe Abschnitt B.4). Dabei ist zu beachten, daß das Studium des Einflusses beton-technologischer Parameter auf die Porosität und Dichtigkeit nicht zu den vorrangigen Zielen gehört. Die Versuchsanzahl und die Variation der Parameter wurden bewußt eng begrenzt. Sie sind ausreichend, um grundsätzliche Zusammenhänge zwischen den Meßgrößen herstellen zu können und um Modelle zur Prognose der Dauerhaftigkeit entwickeln zu können.

2. VERSUCHSKÖRPER

2.1 Auswahl der Versuchskörper und Umfang der Eignungsversuche

Entsprechend den Hauptzielen der Arbeit (Tab. B1) sollen die Porosität und die Dichtigkeit oberflächennaher Betonschichten über längere Zeiträume und bei realistischer Klimaeinwirkung gemessen werden. Hierzu wurden als Versuchskörper die Wände A - D gewählt, die praxisnah hergestellt und sowohl einer Frei- als auch Laborlagerung unterzogen wurden. Es wurde so früh wie möglich (Spätsommer 1985) mit ihrer Betonage begonnen. Bereits an diesen Wänden erfolgte die Anwendung aller Meßverfahren ohne vorherige Eignungsversuche. Dies ist vertretbar, da alle verwendeten Meßtechniken grundsätzlich bekannt sind.

Nachträglich konnten dann erst die Versuchskörper hergestellt werden (Wand I - VIII), an denen die Versuchstechniken umfangreichen Eignungsuntersuchungen unterzogen wurden.

Für das Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie wurden keine Eignungsversuche durchgeführt. Hierzu wird auf die Ringversuche [B1] verwiesen.

Das Ziel der Eignungsversuche ist nicht nur die Feststellung der Genauigkeit (Streuung) der Meßtechnik an sich. Das Hauptinteresse gilt der Aussagekraft der Meßergebnisse zur Charakterisierung der dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften. Diese hängen entscheidend von der Streuung der Betoneigenschaften ab. Die Streuung ist abhängig von der Sorgfalt und den Verfahren der Betonherstellung und Nachbehandlung sowie den bei der Auswahl der Betonausgangsstoffe beachteten Anforderungen. Die zu erwartenden Streuungen sind sehr groß, da weder Verfahren noch Regelungen bekannt bzw. anzuwenden sind, die bei der Betonherstellung Zielsetzungen in Richtung Streuungsminimierung verfolgen.

Deshalb wurden, um den Vergleich mit realen Bauwerken zu haben, auch bei der Herstellung der Versuchskörper keine besonderen Maßnahmen oder Auswahlkriterien berücksichtigt. Bei der gegenwärtigen Praxis der Betonherstellung können die Werte für die Streuung nur als gegeben hingenommen werden.

Vereinfachend wird davon ausgegangen, daß sich die Gesamtstreuung aus den beiden Anteilen:

- Streuung des Meßverfahrens
- Streuung des Materialverhaltens

zusammensetzt. Der Gesamtvariationskoeffizient ergibt sich somit zu:

$$V_{\text{ges}} = \sqrt{V_m^2 + V_b^2} \quad (\text{B1})$$

mit:

- V_{ges} : Gesamtvariationskoeffizient
- V_m : Variationskoeffizient des Meßverfahrens
- V_b : Variationskoeffizient des Materialverhaltens

Gl. (B1) ist für verschiedene Werte von V_m in Bild B1 graphisch dargestellt. Dabei lassen sich drei Bereiche abgrenzen, in denen sich der zu erwartende Variationskoeffizient der Meßtechnik von $V_m \leq 10 \%$ unterschiedlich auswirkt:

a) $V_b \leq 10 \%$

Auf den Gesamtvariationskoeffizienten übt der Teilvariationskoeffizient Meßtechnik einen großen Einfluß aus.

b) $10 < V_b \leq 20 \%$

Der Gesamtvariationskoeffizient wird in erster Linie von dem Variationskoeffizienten des Betons bestimmt, der Variationskoeffizient des Meßverfahrens ist von abnehmender Bedeutung.

c) $V_b > 20 \%$

Der Variationskoeffizient des Meßverfahrens kann gegenüber demjenigen des Betons vernachlässigt werden; V_b und V_{ges} sind nahezu gleich groß.

Geht man für die weiteren Vorüberlegungen, die den Rahmen der Betrachtungen zu dem Forschungsziel Eignungsnachweis abstecken sollen, von aus Literaturangaben [B2,B3,B4,B5,B6] entnommenen Werten zur Größe des Gesamtvariationskoeffizienten für Dichtigkeitsmeßverfahren von:

$V_{\text{ges}} \approx 30 - 35 \%$

aus, so zeigt sich, daß:

- a) vereinfachend der Gesamtvariationskoeffizient dem Material Beton zuschreibbar ist: $V_b \approx V_{\text{ges}}$ (V_{ges} wird somit als Maximalwert (Abschätzung zur sicheren Seite) des Variationskoeffizienten der Betoneigenschaften aufgefaßt),
- b) der Anwendung einfacher Meßtechniken die ein schnelles Ergebnis liefern, robust in ihrer Ausführung und Anwendung sind, der Vorzug vor "Feinmeßgeräten" zu geben ist,
- c) künftige Untersuchungen dem Ziel einer Verbesserung der Regelungen zur Auswahl der Betonausgangsstoffe und der Praxis der Betonherstellung mehr Gewicht zuwenden sollten, als demjenigen einer Verbesserung der Prüftechniken, da nur so eine spürbare Verringerung des Gesamtvariationskoeffizienten zu erzielen ist.

Die Schlußfolgerungen gelten nur, wenn die hier unterstellte Annahme, daß $V_m \leq 10 \%$ ist, nachgewiesen werden kann. Für diesen Fall ist nicht dem Meßverfahren, sondern dem Beton an sich die Streuung zuzuschreiben. Somit können die Eignungsversuche zur Ermittlung der Prüfstreuung auf das Mindestmaß beschränkt werden.

2.2 Wände A - D

2.2.1 Überblick

Im Herbst 1985 und Frühsommer 1986 wurden insgesamt 6 unbewehrte Wände hergestellt (Bild B2). Bei den Wänden C und D handelt es sich um Mörtelmischungen. Die Betone wurden so festgelegt, daß nach der "Richtlinie zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton" (Fassung März 1983) für Wand A ein dauerhafter Beton gewählt wurde, während der Beton von Wand B diesen Anforderungen nicht genügt. Tab. B2 enthält die Parametervariation.

2.2.2 Zusammensetzung der Betone

Folgende Ausgangsstoffe wurden gewählt:

- Zement: PZ 35 F
- Zuschlag: Sieblinie B16 bzw. C4 nach DIN 1045
bestehend aus:
 - Sand 0/2a (nördliches Harzvorland)
 - Kies 4/8 und 8/16 aus Frechen (reiner, gut gerundeter Quarzkies)

Die Mischungszusammensetzung der Betone und Mörtel ist Tabelle B3 zu entnehmen.

2.2.3 Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper

Die Betonherstellung erfolgte im Zwangsmischer. Für jede Wand waren 2 Teilmischungen erforderlich. Der Mischvorgang erfolgte so, daß zunächst 30 sec. lang Zuschlag und Zement trocken vorgemischt wurden. Bei laufendem Mischer wurde dann die Anmachwassermenge zugegeben. Der sich anschließende eigentliche Mischvorgang dauerte 120 sec.

In Tab. B4 sind die Mittelwerte der gemessenen Frischbetoneigenschaften für die beiden Teilmischungen einer Wand wiedergegeben. Der angestrebte Sollwert des Ausbreitmaßes wurde auf $a = 40$ cm festgelegt. Bis auf Wand D, konnte dies durch unterschiedlich hohe Fließmittelzugaben erreicht werden (siehe Tab. B4). Herstellungsbedingte Unterschiede zwischen den Teilmischungen sowie zwischen den oberflächennahen Schichten der beiden Wandseiten können als zufällig angesehen werden.

Als Schalung wurde glattes Sperrholz verwendet. Die Verdichtung erfolgte sowohl durch Innen- als auch durch Schalungsrüttler. Außerdem wurden die in Tab. B5 aufgeführten Begleitkörper hergestellt.

2.2.4 Nachbehandlung und Lagerung

An jeder Wand wurden 2 verschiedene Nachbehandlungsarten ausgeführt. Unter Beachtung der Orientierung der Wände von Bild B2, sind dies:

- linke Wandhälfte (Nachbehandlung 1):

- einen Tag in Schalung
- 7 Tage ungeschützt im Versuchskeller
- danach ohne weitere Behandlung den entsprechenden Lagerungsklimaten ausgesetzt

Dieser Wandteil wird im folgenden als "nicht nachbehandelte Wandhälfte" bezeichnet.

- rechte Wandhälfte (Nachbehandlung 2):

- einen Tag in Schalung
- 7 Tage unter feuchten Tüchern und Folie im Versuchskeller
- danach ohne weitere Behandlung den entsprechenden Lagerungsklimaten ausgesetzt

Dieser Wandteil wird im folgenden als "nachbehandelte Wandhälfte" bezeichnet.

Die Betonage der Wände A, B und C erfolgte im Herbst. Dies ist eine Zeit häufiger Niederschläge. Für die im Freien aufgestellten Wände hat diese Witterung vermutlich eine ähnliche Wirkung wie eine feuchte Nachbehandlung. Um die Auswirkungen des Betonierdatums auf die Betonqualität feststellen zu können, wurde deshalb im darauffolgenden Frühsommer nachträglich die Wand D hergestellt, die in ihrer Zusammensetzung Wand C entspricht.

Wie Tab. B2 zu entnehmen ist, soll der Einfluß der Witterung auf den Beton durch folgende Lagerungsbedingungen studiert werden:

- Wände

- F-Lagerung: Die Wände werden im Freien aufgestellt und ungeschützt der Witterung ausgesetzt.
- L-Lagerung: Aufstellung der Wände im Laborklima 20/65.

- Kleinkörper

- K-Lagerung: Beanspruchung der Kleinkörper durch ein künstlich erzeugtes Klima, bestehend aus systematischen Wechseln von Beregnung und Temperatur (Zeitraffungsversuche).

Für die Wände erfolgt der Beginn der Lagerung unmittelbar nach dem Ende der Nachbehandlung. Die Kleinkörper lagerten bis zum Prüfbeginn mindestens

1 Jahr im Versuchskeller (Nachbehandlung 2). Hydratationsvorgänge sind bis zu diesem Zeitpunkt weitestgehend abgeschlossen. Ihre Überlagerung mit Veränderungen infolge künstlicher Bewitterung sind damit ausgeschlossen. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des Verhaltens der unterschiedlichen Betone im künstlichen Klima, jedoch keinen unmittelbaren Vergleich mit den natürlich bewitterten Wänden.

Für die im Freien aufgestellten Wände wurde eine Ausrichtung in Ost-West Richtung gewählt. Die bewitterten Wandflächen weisen somit nach Norden und Süden. Die nicht nachbehandelte Wandhälfte bildet dadurch den westlichen Teil der Wand. Die Aufstellung der Wände erfolgte parallel zur Hauptwetterrichtung, damit beide Wandseiten einer vergleichbaren Beanspruchung unterliegen. Veränderungen in der Oberflächenschicht der Nordseite und der Südseite sind eher vergleichbar, als diejenigen zwischen bewitterten West- und Ostseiten.

2.2.5 Bohrkernentnahme

Zur Untersuchung des Witterungseinflusses werden den Wänden zu verschiedenen Altern Bohrkern mit einem Durchmesser von $d = 100 \text{ mm}$ entnommen. Die Lage und Bezeichnung der Bohrkern kann Bild B2 entnommen werden. Die weitere Bohrkernaufteilung zu Prüfkörpern für die einzelnen Versuche wird im Abschnitt B.4 behandelt. Auf Grund des gewählten Schemas der Bohrkernnummerierung stammen alle Bohrkern, deren Endziffer der Bohrkernnummer kleiner gleich 5 ist, aus der nicht nachbehandelten Wandhälfte. Ein entsprechender Plan zur Bohrkernentnahme der Kleinkörper ist nicht erforderlich, da die Prüffläche nicht weiter unterteilt wurde. Die Auswahl der Entnahmestellen erfolgte zufällig.

Die Bohrkernentnahme erfolgte im Versuchskeller. Hierzu wurden die im Freien aufgestellten Wände in den Keller transportiert. Die Unterbrechung der Lagerung erfolgte nur für den Bohrvorgang und das anschließende Verfüllen der Bohrlöcher mit Mörtel. Letzteres ist erforderlich, um einen Witterungsangriff über die Bohrlochmantelfläche auszuschließen.

Die Bohrkernentnahme erfolgte durch Naßbohrung. Die Bohrrichtung wurde einheitlich festgelegt (von der Wandnordseite zur Wandsüdseite).

2.2.6 Festbetoneigenschaften

Tab. B6 enthält alle Angaben zu den an den Begleitkörpern der im Freien aufgestellten Wände durchgeführten Festbetonprüfungen.

2.3 Wände I - VIII

2.3.1 Überblick

Bei der zweiten Betonageserie (Sommer - Herbst 1987) wurden insgesamt 16 bewehrte Wände hergestellt (Bild B3); 8 Betonagen zu je 2 Wänden. Die beiden Wände einer Betonage sind hinsichtlich Betonzusammensetzung, Herstellung, Nachbehandlung und Bewehrung identisch. Sie unterscheiden sich durch den Einbau von MeBelementen. Dabei handelt es sich um Thermoelemente und Stab- bzw. Drahtelektrodenpaare. Die letzteren dienen zur Messung des elektrischen Widerstands des Betons über den eine Abschätzung des feuchtegehalts erfolgen soll. Der Einbau erfolgte in verschiedenen Wandtiefen (Bild B3). Zur weiteren Unterscheidung wird im folgenden die Wand ohne MeBelemente zusätzlich mit a, die Wand mit MeBelementen zusätzlich mit b bezeichnet.

Alle Wände wurden im Freien aufgestellt. Eine Bohrkernentnahme erfolgt nur an den Wänden ohne einbetonierte MeBelemente (a). Die Wände mit MeBelementen (b) dienen dem Eignungsnachweis zerstörungsfreier Dichtigkeitsmeßverfahren, zu deren Durchführung begleitende Temperatur- und Feuchtemessungen erforderlich sind. Eine Übersicht über die Parameter ist Tab. B7 zu entnehmen.

Dadurch, daß

- die Wanddicke von $d = 12 \text{ cm}$,
- die 2-lagige Bewehrungsanordnung,
- der lichte Abstand der Bewehrungsstäbe,
- die Dicke der Betondeckung,
- der Durchmesser des Zuschlaggrößtkornes
- und teilweise die Verarbeitbarkeit des Betons

nicht aufeinander abgestimmt wurden, und durch die Wahl hoher w/z-Werte und unzureichender Zementgehalte, entstanden zum Teil nicht dauerhafte Betone. Derartige Verhältnisse und Bedingungen sind in der Baupraxis häufig Ausgangspunkt eines frühzeitigen Dauerhaftigkeitsverlustes. Die Eignung von zerstörungsfreien Dichtigkeitsmeßmethoden an derartigen Wänden zu untersuchen, soll die hier verfolgte Absicht unterstreichen, an Hand der Forschungsergebnisse realistische Schlußfolgerungen für baupraktische Fälle ziehen zu können.

2.3.2 Zusammensetzung der Betone

Die Ausgangsstoffe sind:

- Zement: PZ 35 F
- Zuschlag: Sieblinie B/C-32 nach DIN 1045 bestehend aus Sand-Kies Material des nördlichen Harzvorlandes
- Zusatzstoff: Kalksteinmehl aus dem nördlichen Harzvorland

Die Mischungszusammensetzung ist Tab. B7 zu entnehmen.

2.3.3 Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper

Die Herstellung der Betone erfolgte in einem Zwangsmischer. Für die Betonage eines Wandpaares einschließlich der Begleitkörper waren 3 Teilmischungen erforderlich. Der Mischvorgang und die Art der Frischbetonprüfungen ist mit denen der Betonage von Wand A - D identisch.

Der Beton jeder Teilmischung wurde gleichmäßig auf die beiden Wände und die entsprechende Zahl von Begleitkörpern verteilt (Tab. B8).

Die Frischbetoneigenschaften (Mittelwerte der Teilmischungen) sind Tab. B9 zu entnehmen. Darüberhinaus wurden über die einbetonierten Thermoelemente die Hydratationswärmeentwicklung der Wände gemessen. Auf deren Ergebnisse wird hier nicht eingegangen.

Es wurde ein Ausbreitmaß von $a = 40$ cm angestrebt. Versuchsbetonagen zur Ermittlung der notwendigen Fließmittel- bzw. Kalksteinmehlzugabe gingen den eigentlichen Betonagen voraus, und führten auf die in Tab. B7 angegebenen

Betonzusammensetzung. Wie Tab. B9 zeigt, wiesen die Betone von Wand I und II eine zu steife Konsistenz auf ($a = 33$ bzw. 34 cm). Der Grund hierfür konnte nicht geklärt werden. Die ebenfalls gemessenen Verdichtungsmaße entsprachen den angestrebten Sollwerten. Für die vorliegende Bauteilgeometrie und Bewehrungsführung erwiesen sich die Konsistenzen dieser Betone dennoch als zu steif. Es kam zu Entmischungen und Verdichtungsfehlern im Bereich des Wandfußes. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Wänden I und II zu gewährleisten, wurde die Betonzusammensetzung für Wand II gegenüber Wand I nicht verändert. Für die Wände VII und VIII war auf Grund der großen und wasserreichen Zementleimmenge von vornherein eine weiche Konsistenz zu erwarten. Die Wände wurden in einer senkrecht stehenden, kunststoffbeschichteten Holzschalung hergestellt. Die Verdichtung erfolgte über Innen- und Schalungsrüttler.

Die Hauptbewehrung jeder Wand besteht aus Einzelstäben mit einem Durchmesser von 12 mm und einem lichten Abstand von 20 mm. Diese Anordnung soll eine Bewehrungskonzentration simulieren. Sie wurde nur auf einer Wandseite angeordnet, die als "bewehrte Wandseite" bezeichnet wird.

Die andere Wandseite wurde mit einer Betonstahlmatte Q221 mit 15 mm Betondeckung bewehrt: "unbewehrte Wandseite".

Wie aus Bild B3 hervorgeht, wurden die Betondeckungen der Einzelstäbe, jeweils auf Bereichen von 30 cm Breite, in Schritten von 5 mm, bei 5 mm beginnend, bis auf 30 mm gesteigert. Jede Wand enthält somit 6 verschiedene Betondeckungen.

2.3.4 Nachbehandlung und Lagerung

Auch bei diesen Wänden wurde jede Betonzusammensetzung in zwei verschiedenen Nachbehandlungsarten ausgeführt. Im Gegensatz zu den Wänden A - D bezieht sich diese jeweils auf die gesamte Wandfläche, so daß zu jeder Betonzusammensetzung insgesamt 4 Wände hergestellt wurden. Folgende Nachbehandlungsarten wurden ausgeführt:

- "schlechte Nachbehandlung" (Nachbehandlung 3):
 - einen Tag in Schalung
 - Lagerung bis zum 28. Tag in der Versuchshalle unter Ausschluß jeglichen Wasserkontakts
 - danach Aufstellung im FreienDies betrifft die Wände mit einer ungeraden Ziffer als Wandbezeichnung.
- "gute Nachbehandlung" (Nachbehandlung 4):
 - einen Tag in Schalung
 - Lagerung bis zum 7. Tag unter feuchten Tüchern und Folie
 - unmittelbar danach Aufstellung im FreienBetonagen mit dieser Nachbehandlung erhalten eine gerade Ziffer als Bezeichnung.

Nach der Nachbehandlung wurden die Wände im Freien aufgestellt. Dies erfolgte auch für diese Wände in Ost-West-Richtung. Die bewehrte Seite weist somit nach Norden. Die Aufstellung erfolgte mit einer Neigung von 5° gegen die Vertikale in einem Holzgestell.

2.3.5 Bohrkernentnahme

Die Bohrkernentnahme erfolgte nur aus den Wänden ohne einbetonierte Meßelemente, siehe Bild B4. Die Bohrkernaufteilung wird im Abschnitt B.4 behandelt.

Die Bohrkernentnahme (Naßbohrung) erfolgte im Versuchskeller. Während derselben war somit die Lagerung im Freien unterbrochen. Die Bohrrichtung erfolgte von der unbewehrten zur bewehrten Wandseite, um die Zerstörung der Betondeckungen auszuschließen. Die Bohrlöcher wurden entlang der Mantelflächen mit einem Epoxidharzanstrich versehen.

2.4 Untersuchungsmaterial aus bestehenden Bauwerken

2.4.1 Überblick

Das Forschungsvorhaben schließt die Untersuchung älterer Betone, die seit mehreren Jahrzehnten der Witterung ausgesetzt sind ein. Untersucht wurden folgende Bauwerke:

1. Beton aus Versuchshäusern des Zmlabors in Beckum, die 1963 und 1964 betoniert wurden und seitdem ungeschützt der Witterung ausgesetzt sind (Kurzbezeichnung: Beckumer Versuchshäuser).
2. Bohrkerne entnommen aus der 25 Jahre alten Nordwand der Versuchshalle des IBMB (Kurzbezeichnung: Institutswand).
3. Bohrkerne aus einem 1955 betonierten Zellenkühler. Die Entnahmestellen der Bohrkerne liegen größtenteils oberhalb der Lamellen, über denen das Kühlwasser verrieselt worden ist (Kurzbezeichnung: Kühlhauswand).

Von den Beckumer Versuchshäusern sind alle Daten bekannt. Nähere Angaben zur Betonzusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung der Objekte 2 und 3 waren nicht mehr ermittelbar. In beiden Fällen handelt es sich um Betone, deren Dauerhaftigkeit zum Untersuchungszeitpunkt soweit herabgesetzt war, daß eine Sanierung der zugehörigen Bauwerke erforderlich wurde.

2.4.2 Beckumer Versuchshäuser

Insgesamt standen vier Versuchshäuser mit der Bezeichnung HS1 - HS4 zur Verfügung. Deren Standort und Lageplan ist Bild B5 zu entnehmen. Ihre jeweilige Betonzusammensetzung ist Tab. B10 zu entnehmen.

Die Herstellung der Häuser erfolgte im Freien auf den dazu zuvor erstellten Fundamenten. Die Rohbaumaße zeigt Bild B6. Eine Bewehrungsanordnung erfolgte nur im Bereich der Wandecken.

Die Schalung bestand aus gehobelten Brettern. Die Verdichtung erfolgte mittels Rüttelflaschen. Der Betoniervorgang eines Hauses nahm ca. 2 Stunden in

Anspruch. Weitere Einzelheiten des Betoniervorgangs können dem Überwachungsbericht Nr. II/13 249/64 der MPA Dortmund entnommen werden.

Die Wände blieben 5 Tage in der Schalung. Eine weitere Nachbehandlung erfolgte nicht.

Die Frischbetoneigenschaften der Betone sind Tab. B11 zu entnehmen. Tab. B12 enthält die Ergebnisse der Zementanalysen. Vergleicht man diese mit Angaben zur mittleren chemischen Zusammensetzung von Zement nach [B7], so ergeben sich keine auffälligen Abweichungen. Zu beachten ist allerdings beim PZ 275 die niedrige Mahlfeinheit von ca. $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ sowie der um ca. 40 % geringere Anteil an C_3S -Phasen und der doppelt so hohe Anteil der Klinkerphase C_2S . Wie auch an Hand der Festigkeitsentwicklung ablesbar ist, handelt es sich um einen langsam erhärtenden Zement (kein signifikanter Unterschied zu den Hochofenzementen, siehe Tab. B12).

Folgende Druckfestigkeiten wurden gemessen (Prüfalter 28 Tage, 3 Würfel mit 20 cm Kantenlänge):

Haus 1: $\beta_D = 35,8 \text{ N/mm}^2$

Haus 2: $\beta_D = 51,3 \text{ N/mm}^2$

Haus 3: $\beta_D = 41,7 \text{ N/mm}^2$

Haus 4: $\beta_D = 32,8 \text{ N/mm}^2$

Im März 1988 wurden 10 Bohrkerne je Haus aus der Ost- und Westwand entnommen und in Kunststoffolie verpackt. Unterlagen über die bisherigen Messungen zur Karbonatisierungstiefe liegen vor. Die weitere Bohrkernaufteilung sowie Einzelheiten zu den im September 1988 in Beckum durchgeführten Dichtigkeitsmessungen werden im Abschnitt B/4 erläutert.

Zum Zeitpunkt der Dichtigkeitsmessungen waren die Oberflächen in folgendem Zustand:

- Innenwände: glatt, keine Abwitterungen, Schalungsabdrücke noch gut erkennbar

- Außenseite: Haus 1 - 3: Oberflächen sind z.T. stark abgewittert und abgesandet; lose anhaftende Feinteile; z.T. Algen und Moosbewuchs

Haus 4 : wie zuvor; zusätzlich im Bereich der fugen der Brettschalung erhebliche Auswaschungen (Zuschlagkörner liegen frei)

Frühere Versuche an diesen Häusern sind in [B8,B9] veröffentlicht.

2.4.3 Institutswand

Aus der Augenscheinbeurteilung der Wand und der daraus gewonnenen Bohrkerne ($d = 100 \text{ mm}$) ergibt sich folgendes Bild: Die Wand ($d = 30 \text{ cm}$) zeigte zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme (Mai 1987) deutliche Spuren von Verwitterung. Die Oberfläche ist abgewittert und zeigt Abwaschungen des Feinmörtels bis zu einer Tiefe von ca. 3 mm . Die Bohrkernentnahme erfolgte aus solchen Wandbereichen. Betonbereiche, in denen die Dauerhaftigkeit nicht mehr vorhanden war (Risse, Abplatzungen, Korrosionsschäden) wurden nicht näher untersucht. Die Bohrkernentnahme erfolgte unmittelbar vor der Sanierung.

Das Grobgefüge wurde an Hand der Schnittflächen der Bohrkerne nach Augenschein beurteilt. Der Beton weist danach ein porenarmes, dichtes Gefüge auf. Das Größtkorn der Zuschläge hat einen Durchmesser von ca. 30 mm . Der Zuschlag besteht aus gerundetem Sand-Kies-Material. Es wurde eine sandreiche Sieblinie verwendet.

Die blau-grüne Färbung der Bruchfläche läßt auf die Verwendung eines H0Z schließen. Abdruckflächen von Zuschlagkörnern in dieser Bruchfläche sind leicht ritzbar und weisen zahlreiche sichtbare Poren auf. Dies läßt auf einen eher hohen w/z -Wert schließen.

Ein Teil der Bohrkerne enthielt Bewehrungsstäbe. Die gemessenen Betondeckungen weisen mit $c = 16, 18, 30, 38, 45$ und 48 mm stark unterschiedliche Werte auf (Mittelwert: $32,5 \text{ mm}$). Die Karbonatisierungstiefe, zwischen 22 und 41 mm liegend, beträgt im Mittel: $\bar{x}_c = 32,2 \text{ mm}$ (ermittelt an 4 Bohrkernabschnitten mit 10 cm Meßlänge und einem Abstand der Messungen von

1,5 cm). Die Standardabweichung beträgt 4,8 mm, der Variationskoeffizient demnach 15 %.

Insgesamt wurden aus einer Fläche von ca. 2 m², 0,80 - 1,50 m über Erdboden, 6 Bohrkern Ø 100 mm entnommen.

2.4.4 Kühlhauswand

Unterlagen zur Planung und Ausführung liegen nicht vor. Die Wandflächen zeigen beträchtliche Betonkorrosion. Die 15 cm dicke Stahlbetonwand ist stark abgewittert und besitzt zahlreiche Risse. Der Feinmörtel ist oberflächlich ausgewaschen mit einer mehrere Millimeter großen Rauhtiefe. Bereichsweise sind die Wände mit Algen bewachsen. Die Bohrkernentnahme erfolgte aus rissefreien Bereichen.

Das Grobgefüge der Schnittflächen der Bohrkern zeigt einen porenreichen, nur mäßig verdichteten Beton. Der Durchmesser des Größtkorns des Zuschlags beträgt ca. 30 mm. Die Sieblinie ist sandreich.

Im Frühjahr 1987 wurden 6 Bohrkern Ø 150 mm entnommen. Die an weiteren Bohrkernen Ø 100 mm gemessenen Betondeckungen liegen zwischen 15 und 43 mm (Mittelwert 26,8 mm, Standardabweichung $\sigma = 5,85$ mm bei 37 Meßwerten). Die mittlere Karbonatisierungstiefe betrug $\bar{x}_c = 4$ mm. Die Werte schwankten zwischen 1 und 20 mm, wobei Karbonatisierungstiefen über 10 mm nur als vereinzelte Spitzenwerte, z.B. an oberflächennahen Grobzuschlägen auftraten (Standardabweichung $\sigma \approx 2,6$ mm bei 17 Meßwerten).

3. VERSUCHSTECHNIK

3.1 Auswahlkriterium

Unter Beachtung von Abschnitt A/2 sei daran erinnert, daß nicht die Korrosionsprozesse der Bewehrung an sich oder ihre unmittelbaren Auswirkungen auf den Beton Gegenstand der Untersuchung sind. Vielmehr sollen laut Antrag: "Untersuchungen mit dem Ziel der Einschätzung der momentanen Porosität (Porenradialverteilung) und Dichtigkeit sowie des mutmaßlichen Lang-

zeitverhaltens (Veränderung dieser Größen in Abhängigkeit der Einwirkungsdauer der Witterung)" durchgeführt werden.

Im einzelnen handelt es sich um die Versuchsarten:

- Quecksilberdruckporosimetrie
- Wasseraufnahme unter Vakuum
- CO₂-Diffusionsversuche
- Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme
- Absorptionsversuche am Bauwerk
- Thermische Analyseverfahren (DTA + TG)
- Karbonatisierungstiefenmessung
- Versuche zur zeitverkürzenden Bewitterung

die im folgenden näher beschrieben werden.

Dabei wird auf eine Erläuterung der thermischen Analyseverfahren verzichtet, da sie nur stichprobenartig durchgeführt wurden (deshalb finden diese Untersuchungen auch keinen Eingang in die Versuchspläne des Abschnittes B4).

Für die Messung von Karbonatisierungstiefen mittels Phenolphthalein sind ebenfalls keine weiteren Erklärungen nötig, da es sich hierbei um ein allgemein anerkanntes und benutztes Verfahren handelt (näheres siehe [B10]).

3.2 Quecksilberdruckporosimetrie

Meßprinzip: In eine Betonprobe ($b/d/l \approx 8/8/40$ mm) wird im Dilatometergefäß des Porosimeters Quecksilber (nicht benetzende Flüssigkeit) mit stufenförmig steigendem Druck eingepreßt.

Meßgröße: Das zu den verschiedenen Druckstufen eingedrungene Quecksilbertvolumen wird automatisch registriert.

Meßgerät: Es wurde ein handelsübliches Gerät der Firma CARLO ERBA Instruments mit einem Arbeitsbereich bis 2000 bar benutzt. Die Proben wurden vor Versuchsbeginn im Vakuum bei 10^{-2} Torr getrocknet.

Auswertung: Zwischen dem aufgebrauchten äußeren Druck p_a und der Abmessung und Form des Hohlraums (Pore, Riß), in den das Quecksilber eingepreßt wird, besteht ein physikalischer Zusammenhang: Der äußere Druck p_a steht im Gleichgewicht zum Kapillardruck p_k des Quecksilbermeniskus im Festkörperhohlraum. Bestimmende Größen des Kapillardrucks sind die Oberflächenspannung des Quecksilbers und die geometrische Form des Meniskus.

Bei Annahme kreiszylindrischer Porenform (Bild B7) gilt die Laplace-Gleichung:

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \vartheta}{r} \quad (B2)$$

mit:

p : Kapillardruck [N/m^2]

σ : Oberflächenspannung [N/m]; $\sigma_{\text{Hg}} = 0,480 \text{ N/m}$

ϑ : Benetzungswinkel [$^\circ$]; $\vartheta_{\text{Hg}} = 141,3^\circ$

r : Porenradius [m]

Zu einer Druckstufe werden immer jene Poren gefüllt, in denen sich ein Kapillardruck p_k einstellt, der (kleiner) gleich dem Druck p_a dieser Druckstufe ist. Der zugehörige Porenradius kann aus Gl. (B2) ermittelt werden. Das eingepreßte Quecksilbervolumen entspricht dem Porenvolumen.

Das Meßergebnis $\epsilon(r)$ wird in Form einer integralen Porenradienverteilung aufgetragen (Summenkurve des bis zu einem Radius r eingepreßten Quecksilbervolumens; Bild B8 oben). Durch numerische Differentiation kann hieraus die differentielle Porenradienverteilung gewonnen werden [B11]. Sie gibt an, wieviel Porenvolumen auf jeden Radius (des Meßbereichs) entfällt (Häufigkeitsverteilung der Porenradien; Bild B8 unten). Da eine kreiszylindrische Porenform angenommen wird, besitzt die so ermittelte Porenradienverteilung nur Modellcharakter.

Zwei weitere Kritikpunkte betreffen die untersuchten Proben:

- Das Verhältnis von Zuschlag- zu Zementsteinanteil der einzelnen Probe bleibt unbekannt. Nur Proben mit grob von der mittleren Betonzusammensetzung abweichenden Verhältnissen werden durch Beurteilung nach Augenschein ausgeschieden.
- Die Probengröße kann nicht als repräsentativ für den Beton angesehen werden (Proben mit wenigen "großen" Zuschlägen ergeben im Vergleich zu Proben mit volumenmäßig gleichen Zuschlaganteil verteilt auf viele "kleine" Zuschläge, unterschiedliche Ergebnisse).

Neben dem unmittelbaren Versuchsergebnis $\epsilon(r)$ existieren bisher keine Möglichkeiten zur darüberhinausgehenden Auswertung der Ergebnisse. Entsprechende Verfahren werden deshalb im Berichtsteil C abgeleitet und erläutert.

3.3 Porositätsbestimmung durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum [B12]

Meßprinzip: Durch Wasserlagerung einer Betonprobe Feststellung der Wasseraufnahme bei Sättigung der Proben unter Atmosphärendruck und bei Sättigung im Vakuum.

Meßgröße: Aus dem Wassergehalt der Proben in den beiden Sättigungszuständen können die Gesamtporosität, die unter Atmosphärendruck durch Kapillarleitung füllbare Porosität, sowie die Trockenrohddichte und die Reindichte des untersuchten Betons bestimmt werden.

Meßgeräte: An Geräten werden benötigt

- Waage (Ablesegenauigkeit: 1/100 g)
- Vakuumpumpe
- Exsikkatoren (mit einer Einrichtung zum Fluten des Exsikkators unter Vakuum)
- Trockenschrank.

Meßvorgang: Die Proben (hier Bohrkernabschnitte) werden nach dem Wiegen (im folgenden als Probengewicht zu Versuchsbeginn M_A bezeichnet) zunächst

24 Stunden halb eingetaucht in ein Wasserbad gestellt. Anschließend erfolgt eine mindestens 6 tägige Wassersättigung unter Atmosphärendruck durch vollständiges Eintauchen der Proben in das Wasserbad. Das sich daraus ergebende Probengewicht ist durch Wiegen der Probe unter und über Wasser festzustellen ($M_{\text{(über Wasser)}}$; $M_{\text{(unter Wasser)}}$). Danach werden die Proben 22 Stunden im Trockenschrank bei 50 °C getrocknet und in einem Exsikkator eingebracht. Dieser wird nach dem Aufbringen eines Vakuums geflutet (Steiggeschwindigkeit ca. 5 mm pro Minute).

Die Proben verbleiben für 3 Tage im Exsikkator, bevor sie erneut unter und über Wasser gewogen werden ($M_{\text{V(unter Wasser)}}$; $M_{\text{V(über Wasser)}}$). Nach einer abschließenden 3 täglichen Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C erfolgt die Feststellung des Trockengewichts M_{105} .

Auswertung: Mit Hilfe der ermittelten Probengewichte lassen sich folgende Größen bestimmen:

1) Probenvolumen V

$$V = \frac{M_{\text{(über Wasser)}} - M_{\text{(unter Wasser)}}}{\rho_w} \quad (\text{B3})$$

mit

V : Probenvolumen [m^3]

ρ_w : Rohdichte des Wassers [$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$]

M : Gewicht des Probekörpers in [kg] nach Sättigung unter Atmosphärendruck, gewogen unter und über Wasser

2) Wassergehalt zu Versuchsbeginn u_A

$$u_A = \frac{M_A - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (\text{B4})$$

mit

u_A : Wassergehalt der Probe zu Versuchsbeginn bzw. im Anlieferungszustand in [Vol.-%]

M_A : Probengewicht zu Versuchsbeginn in [kg]

M_{105} : Trockengewicht der Probe in [kg]

- 3) Durch Kapillarleitung füllbare Porosität $\varepsilon_{\text{füll}}$ bei Wassersättigung unter Atmosphärendruck in [Vol.-%]

$$\varepsilon_{\text{füll}} = \frac{M_{\text{(über Wasser)}} - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (\text{B5})$$

- 4) Gesamtporosität ε_{ges} (entspricht dem Wassergehalt der Probe am Ende der Wassersättigung unter Vakuum) in [Vol.-%]

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \frac{M_V(\text{über Wasser}) - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (\text{B6})$$

- 5) Trockenrohdichte ρ_{tr} des Betons in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$$\rho_{\text{tr}} = \frac{M_{105}}{V} \quad (\text{B7})$$

- 6) Reindichte ρ des Betons in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$$\rho = \rho_{\text{tr}} \cdot \frac{100}{100 - \varepsilon_{\text{ges}}} \quad (\text{B8})$$

Anwendungsgrenzen: Wie an Hand der Versuchsauswertung erkennbar ist, kann nur der Mittelwert der Porosität (gilt sowohl für $\varepsilon_{\text{füll}}$ wie auch für ε_{ges}) der gesamten Probe bestimmt werden. Eine Aussage über das Porositätsgefälle von Betonproben, die oberflächlich entnommen wurden (z.B. Bohrkernabschnitt der Betondeckung), und die, wie in [B13] und [B14] nachgewiesen werden konnte, ein solches Gefälle besitzen, kann mittels dieser Untersuchungen nicht gewonnen werden. Darüberhinaus sind keine Aussagen über die Größe der Poren und die Porenform möglich.

3.4 Versuche zur CO_2 -Diffusion

Meßprinzip: In einer Betonprobe (runde Scheiben: \varnothing 100 mm; $d \approx 10$ mm) stellt sich ein CO_2 -Diffusionsstrom ein, wenn ein CO_2 -Partialdruckgefälle herrscht.

Meßgröße: Feststellung der Gewichtszunahme des "Versuchskörpers", bestehend aus einem Alu-Schälchen, dessen oberer Abschluß die Betonprobe darstellt und in der sich Natronkalk als CO_2 -Absorbat befindet, zu verschiedenen Zeiten nach Aufbringen des Partialdruckgefälles.

Meßgerät: Die wesentlichen Elemente der Prüfeinrichtung sind Bild B9 zu entnehmen. Im einzelnen sind dies:

- Truhe, in der eine CO_2 angereicherte Atmosphäre erzeugt werden kann (einschließlich Überdruckventil und Lüfter zur CO_2 -Verwirbelung),
- Einrichtung zur Regelung und Aufrechterhaltung der gewünschten 10-prozentigen CO_2 -Konzentration (Gas-Meß-System GMS 8 der Fa. Winter mit zugehörigen Meßfühler GMS-FCOD),
- CO_2 -Gasflaschen mit Ventilen zur kontrollierten Füllung der Truhe,
- x-y-Schreiber zur Ausgabe der CO_2 -Konzentration in der Truhe (Kontrolle der Versuchsbedingungen; beobachtete Schwankungen der CO_2 -Konzentration lagen zwischen 7,5 und 12,5 % und entsprechen damit der Meßgenauigkeit des Gasfühlers),
- Waage,
- Sonstiges: Probenbehälter (Alu-Schälchen nach DIN 52 615); CO_2 -Absorbat (Natronkalk mit Farbindikator); Dichtungsmasse zum diffusionsdichten Einbau der Betonscheiben auf die Schälchen (Paraffin-Opanol-Mischung im Verhältnis 4:1); Blaugel.

Prüfbedingungen: Nachdem CO_2 -Absorbat (ca. 20 - 25 g) in die Alu-Schälchen eingebracht worden ist, werden die Proben diffusionsdicht aufgesetzt. Die Seitenflächen der Proben werden ebenfalls abgedichtet (eindimensionaler Transport). Die Diffusionsdichtigkeit dieser Maßnahmen wurde überprüft.

Die Proben werden dann in die CO_2 -angereicherte Atmosphäre der Prüftruhe eingebracht (Beginn des Diffusionsvorgangs). Zur Wiegung der Proben muß der Diffusionsvorgang jeweils unterbrochen werden (kurzzeitige Öffnung der Truhe und Entnahme der Proben). Diese Unterbrechung übt jedoch keinen nach-

weisbaren Einfluß auf das Versuchsergebnis aus. Die Wägung der Proben erfolgte in der Regel einmal pro Arbeitstag.

Zur Vermeidung der Karbonatisierung während des Versuchs (Verfälschung des Versuchsergebnisses durch chemisch gebundenes CO_2), erfolgt die Prüfung an getrockneten Proben in getrockneter Atmosphäre. Damit wird auch die Beeinflussung des Versuchsergebnisses durch die ansonsten gleichzeitig stattfindende WD-Diffusion ausgeschlossen.

Der Einfluß einer unterschiedlichen Trocknungsart der Betonscheiben vor dem Diffusionsversuch (Trockenschrank; Vakuumtrocknung) auf den Diffusionsvorgang wurde ebenfalls untersucht (siehe Berichtsteil D).

Auswertung: Nachdem sich ein stationärer Diffusionsstrom eingestellt hat, kann die Gewichtszunahme mit dem 1. Fick'schen Gesetz ausgedrückt werden:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = - D_{\text{CO}_2} \cdot F \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (\text{B9})$$

Hieraus ergibt sich der CO_2 -Diffusionskoeffizient zu:

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta m \cdot \Delta x}{\Delta t \cdot F \cdot \Delta c} \quad (\text{B10})$$

mit

Δm : Gewichtszunahme der Probe [kg]

Δx : Probendicke [m]

Δt : Zeitspanne für die die Gewichtszunahme festgestellt wurde [h]

F : Prüffläche [m^2]

Δc : CO_2 -Konzentrationsdifferenz [kg/m^3 Luft]

Auf weitere mit Hilfe des Diffusionskoeffizienten berechenbare Kennwerte des Diffusionsverhaltens wird hier nicht eingegangen [B15].

Anwendungsgrenzen: Das 1. Fick'sche Gesetz gilt für reine Gasdiffusion. Betonporen haben aber größtenteils Abmessungen, die eine Diffusion im Übergangsgebiet Gas-Knudsen-Diffusion erwarten lassen [B16]. Eine Gesetzmäßigkeit, die die Diffusionsvorgänge in diesem Übergangsgebiet beschreibt, ist

nicht bekannt. Die Versuchsauswertung erfolgt trotzdem nach dem 1. Fick'schen Gesetz, auch wenn dieses nur näherungsweise gilt. Ebenso liefert die Untersuchung an trockenen Proben nicht jenen Wert der Dichtigkeit gegenüber CO₂-Diffusion, der für die Dauerhaftigkeit des der Witterung ausgesetzten Bauteils relevant ist.

3.5 Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme

Meßprinzip: Beaufschlagung der Probenoberfläche mit Wasser (drucklos) und Messung der Wasseraufnahme infolge Kapillarität.

Meßgröße: Die zu bestimmten Saugzeiten nach Versuchsbeginn durch Wägung festgestellte Gewichtszunahme.

Meßgerät: Die Versuchsdurchführung folgt i. w. DIN 52 617. Im Gegensatz dazu erfolgt hier (siehe Bild B10) eine automatische Gewichtsregistrierung über Wägezellen (Typ Z8 bzw. Z11 der Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik) und eine Vielstellenumschaltanlage UPH 3200 zur Meßwertregistrierung und -ausgabe. Dieser Versuchsaufbau besitzt den Vorteil der ununterbrochenen Wägung.

Prüfbedingungen: Die Seitenflächen der Proben wurden nach Trocknung im Vakuum mit Paraffin ummantelt: eindimensionaler Wassertransport ohne Verdunstungsverluste. Die Proben tauchten ca. 2 mm tief in destilliertes Wasser ein. Der Beginn des Saugvorgangs war der Zeitpunkt des Wasserkontakts.

Zur Vermeidung der Verdunstung von Wasser aus dem Reservoir, erhielt der Wasserbehälter eine Abdeckung (bis auf eine kleine Öffnung für die Durchführung der Probenaufhängung). Wasserspiegelschwankungen (Veränderungen des Auftriebs) infolge von Verdunstung oder durch die aufgesaugte Wassermenge konnten so gering gehalten werden, daß ihr Einfluß auf das Versuchsergebnis vernachlässigbar war. Alle Prüfungen erfolgten bei 18 bis 20 °C und ca. 70 % rel. Feuchte. Die Einhaltung dieser Bedingungen ist erforderlich, weil der Transportvorgang temperaturabhängig ist (siehe Berichtsteil C).

Die Prüffläche wurde so gewählt, daß die Beaufschlagung des realen Bauteils simuliert wurde: Wassertransport von der vormals exponierten Wandoberfläche zum Betoninneren.

Auswertung: Die Auftragung der auf die Probengrundfläche bezogenen Gewichtszunahme (Wasseraufnahme) über der Wurzel der Saugzeit t_s , ergibt für quasi-homogene und quasi-isotrope Baustoffe das in Bild B11 dargestellte, prinzipielle Ergebnis. Es zeichnen sich zwei Geraden ab. Ihr Schnittpunkt gibt die Wasseraufnahmemenge zum Zeitpunkt der Probendurchfeuchtung an. Ausgewertet wird nur die erste der beiden Geraden einschließlich des Schnittpunkts (Zustand bis zu dem die Saugfront die Probenoberseite gerade erreicht hat, als Zustand 1 bezeichnet). Folgende Größen werden bestimmt:

- Steigung der Geraden im Zustand 1

Der Proportionalitätsfaktor zwischen der Gewichtszunahme und der Wurzel der Zeit ist der Wasseraufnahmekoeffizient A:

$$A = g_w / \sqrt{t_s} \quad [\text{kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}] \quad (\text{B11})$$

- Zeitpunkt t_{sf} des Schnittpunkts

In dem Zeitraum t_{sf} legt die "Saugfront" den Weg der Probenhöhe d zurück. Dies wird durch den Wassereindringkoeffizienten B

$$B = d / \sqrt{t_{sf}} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{h}}] \quad (\text{B12})$$

ausgedrückt.

- Wasseraufnahmemenge g_f des Schnittpunkts

Die Wasserkapazität ψ ist das Volumenverhältnis von aufgenommenen Wasservolumen zu Probenvolumen im Zustand der kapillaren Durchfeuchtung:

$$\psi = \frac{g_f}{\rho_w \cdot d} \cdot 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad (\text{B13})$$

3.6 Absorptionsversuche am Bauwerk

3.6.1 Initial Surface Absorption Test (ISAT)

Meßprinzip: Beaufschlagung der Betonoberfläche mit Wasser und Beobachtung der während des Zeitraums Δt_s durch die Betonoberfläche absorbierten Wassermenge (zu verschiedenen Zeitpunkten t_s nach Versuchsbeginn).

Meßgröße: Volumetrische Messung der Wasseraufnahmegeschwindigkeit in Abhängigkeit des Zeitpunkts nach Versuchsbeginn.

Meßgerät: Versuchseinrichtung und -durchführung folgen BS 1881, pt. 5, siehe Bild B12. Der Meßvorgang umfaßt folgende Schritte:

- 1) Wasserdichte Befestigung der Kappe auf der Betonoberfläche (Kitt; ange-
dübelte Stahllaschen und Klemmbügel zur Verschraubung der Kappe gegen
die Laschen).
- 2) Wasserreservoir (Trichter) und Kapillare werden an die Kappe ange-
schlossen. Die Kapillare ist mit einer Skala hinterlegt, die so geeicht
ist, daß der Teilstrichabstand einem Meßwert von $0,01 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ent-
spricht (direkte Ablesung des ISA-Wertes auf der Skala). Der vertikale
Abstand zwischen der Mitte der Kappe und der Kapillare beträgt ca.
20 cm.
- 3) Wasserfüllung des Reservoirs (Ventil zwischen Kappe und Reservoir ist
geschlossen).
- 4) Öffnung des Ventils (Wasserfüllung der Kappe ist der Zeitpunkt des Ver-
suchsbeginns).
- 5) Ablesungen erfolgen zu den Zeitpunkten $t_s = 10; 30; 60$ und 120 Minuten
nach Versuchsbeginn. Dazu ist unmittelbar vor diesen Zeitpunkten die
Wasserzufuhr zwischen Reservoir und Kappe mittels des Ventils zu unter-
brechen. Falls durch die Betonoberfläche noch Wasser absorbiert wird,
muß dieses Wasser aus der Meßkapillare herausgesaugt werden. Der Weg den
der Wassermeniskus in der Kapillare während des Zeitraums von
 $\Delta t_s = 1$ Minute zurücklegt, abgelesen in Skalenteilen, ist der ISA-Wert.

Die Versuchseinrichtung wird direkt auf der Betonoberfläche, ohne diese
weiter vorzubehandeln, angebracht. Da der zu prüfende Beton eine gewisse
Feuchte enthält und der ISA-Wert feuchteabhängig ist [B17], ist nach
BS 1881 eine Messung frühestens 2 Tage nach dem letzten Regenfall durch-
führbar. Wie in [B18] nachgewiesen wurde, ist das Meßergebnis temperaturab-
hängig.

Auswertung: Die Auswertung beruht auf dem physikalischen Gesetz der kapillaren Wasseraufnahme. Die Geschwindigkeit der Wasserabsorption, ist die Ableitung der Wasseraufnahme nach der Zeit. Für die Vereinfachungen:

- eindimensionaler Transport und
- Vernachlässigung des Feuchteinflusses

gilt bei Berücksichtigung der Umrechnung gewichtsbezogener Größen der Wasseraufnahme in die volumenbezogene Größe der ISA-Messung (s. Bild B13):

$$\text{ISA} (t_s) = \frac{dg_w}{dt \cdot \rho_w} = \frac{A}{2\rho_w} t_s^{-1/2} \quad (\text{B14})$$

Abweichungen der Meßwerte von der Proportionalität zwischen ISA und $1/\sqrt{t}$ erklären sich in erster Linie aus der Nichtberücksichtigung der Betonfeuchte, des Feuchtegradienten, der Inhomogenität der Betonporosität über der Wandtiefe und der Vernachlässigung der Dreidimensionalität des Transports.

Anwendungsgrenzen: Ohne Kenntnis der vorhandenen Betonfeuchte sind ISA-Messungen frühestens 2 Tage nach dem letzten Regen durchführbar.

3.6.2 Wassereindringprüfung

Ausgangspunkt der Messung ist die wasserdichte Befestigung einer Meßkappe (\varnothing 80 mm) auf der Betonoberfläche. Die Meßkappe ist mit einem kalibrierten Glasrohr mit Volumeneinteilung verbunden (Bild B14). Die Versuchseinrichtung wird bis zur Nullmarke bzw. einer frei gewählten Anfangsmarke mit Wasser gefüllt. Zu verschiedenen Zeiten t_i nach Versuchsbeginn wird die eingedrungene Wassermenge ΔV_i in m^3 festgestellt. Die anfängliche Füllung erfolgt so, daß eine Wassersäule von weniger als 10 cm Höhe entsteht. Bei sehr saugfähigen Betonen ist durch Auffüllen auf die Höhe der Anfangsmarke dieser Überdruck konstant zu halten. Geringe Schwankungen sind vernachlässigbar.

Die Kappe wird auf der Wandoberfläche mit Kitt angedichtet. Als Prüfflüssigkeit wurde destilliertes bzw. deionisiertes Wasser verwendet. Bei der Prüfung sind die Wasser- und Lufttemperatur festzustellen.

Das Versuchsergebnis ist die bis zum Beobachtungszeitpunkt von der Betonoberfläche absorbierte Wassermenge $\Delta g_i = \Delta V_i \cdot \rho_w$. Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten A_{wt} ist der Quotient aus

$$A_{wt} = \frac{\Delta V_i \cdot \rho_w}{\sqrt{t_i} \cdot F(t)} \quad (B15)$$

wobei $F(t)$ die zur Zeit t vom Kapillartransport durchströmte Fläche ist, die Fläche auf die sich das Wasser verteilt. Für $t = 10$ min kann in guter Näherung $F(t) = F_{\text{Kappe}}$ gesetzt werden, so daß gilt:

$$A_{w10} = \frac{\Delta V_{10} \cdot \rho_w}{\sqrt{10/60} \cdot F_{\text{Kappe}}} = 0,487 \cdot \Delta V_{10} \quad (B16)$$

Anmerkungen:

1. Erste Testversuche zum Wassereindringverhalten wurden mit einem L-förmigen Glaszylinder (Innendurchmesser ca. 30 mm) durchgeführt. Auf deren Ergebnisse wird im folgenden nicht eingegangen, da:
 - a) die Prüffläche mit ca. $7,1 \text{ cm}^2$ keine für Beton repräsentativen Ergebnisse liefert (Prüffläche liegt im Bereich des Größtkornes)
 - b) auf Grund des im Vergleich zur Prüffläche großen Rohrdurchmessers, die Ablesegenauigkeit der eingedrungenen Wassermenge zu grob war, so daß z.T. mehrere Tage erforderlich waren, um ablesbare Wassereindringmengen zu erhalten
 - c) für derart lange Versuchszeiten die räumliche Ausbreitung des eingedrungenen Wassers nicht mehr vernachlässigbar ist, ergeben sich komplizierte Auswertungen
 - d) derartige Versuchszeiten für baupraktische Messungen nicht vertretbar sind (zumal wenn vergleichbare Verfahren bzw. Verfahren zur Permeationsmessung zur Verfügung stehen, die innerhalb eines Zeitraums von 10 - 15 Minuten Ergebnisse liefern).

2. Die Versuche zum drucklosen Wassereindringvermögen beschränken sich auf den Umfang, der ausreicht den physikalischen Zusammenhang des Versuchsergebnisses mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten bzw. den ISA_t -Werten nachzuweisen, da von der Wassereindringprüfung keine darüberhinausgehenden Erkenntnisse erwartet werden.

3.7 Versuchseinrichtung der zeitgerafften, künstlichen Bewitterung von Beton

Versuchsprinzip: Die Simulation von Verwitterungsvorgängen in der betonoberflächennahen Zone durch Erzeugung eines künstlichen Klimas. Dabei wirken die beiden Hauptwettergrößen Temperatur und Feuchte bzw. Niederschlag, die in der Natur zufälligen und bei Betrachtung der Unterschiede zwischen Tag und Nacht sowie zwischen den Jahreszeiten, relativ geringen Schwankungen unterworfen sind, überhöht und in regelmäßig sich abwechselnden Zyklen auf die Betonoberfläche ein.

Meßgröße: Eine spezielle Meßgröße existiert nicht. Vielmehr sind auch für künstlich bewitterte Betone die Eigenschaften Porosität bzw. Porenradienverteilung oder Betondichtigkeit in Abhängigkeit der aufgetragenen Zyklenzahl zu bestimmen. Aus einem Vergleich der dadurch eingetretenen Veränderungen mit denjenigen infolge natürlicher Witterung, kann der Zeitraffungsfaktor ermittelt werden [B19]. Die Berechnung eines solchen Faktors setzt allerdings voraus, daß natürliche und künstliche Bewitterung - bis auf den Faktor Zeit - gleichwertige Vorgänge sind, die gleichartige physikalische und chemische Beanspruchungen darstellen. Infolge künstlicher Bewitterung dürfen sich keine zusätzlichen oder anderen Vorgänge abspielen, als im Fall natürlicher Witterung.

Versuchseinrichtung: Die wesentlichen Elemente einer derartigen Prüfeinrichtung sind:

1. eine Beregnungseinrichtung zur Erzeugung von feucht-trocken Wechseln (entionisiertes Wasser)
2. eine Heizeinrichtung (Heizspiralen) zur Erzeugung von kalt-warm Wechseln, die hier allerdings nur auf die Erzeugung von Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur von ca. 18 - 20 °C ausgelegt ist (Sommerzyklen)

3. einem Temperaturfühler zur Kontrolle der hier gewählten Maximaltemperatur von +80 °C sowie zur Steuerung der Heizleistung
4. und einer handelsüblichen Zeitschaltuhr zur Steuerung der Dauer und zeitlichen Abfolge der Beregnungs- und Heizzyklen.

Eine Skizze der Anordnung dieser Elemente in dem hier entwickelten und benutzten Versuchsstand ist Bild B15 zu entnehmen.

Prüfbedingungen: Der Versuchsstand ist für die Aufnahme und gleichzeitige Bewitterung von zwei Prüfkörpern der Größe $h/d/d = 400 \times 400 \times 200$ mm ausgelegt. Diese erhalten zur Gewährleistung einer Wandbedingungen entsprechenden eindimensionalen Beanspruchung an den fünf nicht bewitterten Seiten eine Ummantelung aus 2 cm dicken Styroporplatten.

Die zusammen mit den Wänden hergestellten Versuchskörper lagerten ab dem Zeitpunkt ihrer Herstellung bis zum Versuchsbeginn im Betonalter von mindestens einem Jahr im Versuchskeller. Sie wiesen zu Versuchsbeginn Karbonatisierungstiefen auf, die denen unter Laborbedingungen gelagerten Wänden entsprechen. Ihr Einbau in den Versuchsstand erfolgte ohne weitere Vorbehandlungen, nachdem ihnen Bohrkern $\varnothing 20$ bzw. $\varnothing 50$ mm zur Feststellung der Ausgangseigenschaften entnommen worden waren.

Die Beregnung mit entionisiertem Wasser erfolgte über ein an der Unterseite perforiertes Kupferrohr, das in Höhe der oberen Styroporummantelung verlief. Da der Versuchsstand einschließlich der Kleinkörper um ca. 10° gegen die Vertikale geneigt war, floß das Wasser unter Bildung eines geschlossenen Wasserfilms über die Versuchskörperoberfläche. Während des Zeitraums der Beregnung kam es zu einer kapillaren Wasseraufnahme des Betons. Beregnungen erfolgten nur bei Raumtemperatur.

Temperaturwechsel wurden dadurch erzeugt, daß die über die Heizspiralen auf maximal 80 °C aufgeheizte Luft mittels des über den Lüftermotor angetriebenen Lüfterrads entlang der Leitbleche gleichmäßig an der Betonoberfläche vorbeigeführt wurde. Die dabei auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten wurden nicht gemessen. Es sollte eine rasche Trocknung mit hoher Trocknungsleistung erreicht werden (näheres siehe unten und Bild B16).

In einer ersten Prüfserie wurden in kontinuierlichen Wechseln folgende Beanspruchungen aufgebracht:

10-minütige Beregnung mittels entionisierten Leitungswasser, dessen Temperatur je nach Jahreszeit schätzungsweise zwischen 8 und 15 °C schwankte;

20-minütige Trocknung mittels bis zu 80 °C heißer Luft.

Die unmittelbaren Auswirkungen dieser Beanspruchungen auf die äußersten 5 cm der Betonoberfläche für einen Versuchskörper zugehörig zu Wand B sind in Bild B16 dargestellt. Die Messungen wurden durchgeführt nachdem sich quasi stationäre Verhältnisse eingestellt hatten (mehr als 200 Zyklen). Insbesondere für die äußersten 10 mm ergeben sich beträchtliche Temperaturdifferenzen von ca. 8 °C (minimale Wassertemperatur im Winter) bis +80 °C infolge maximaler Trocknungstemperatur. Große Schwankungen wurden auch für die Betonfeuchte des unmittelbaren Oberflächenbereichs festgestellt. Deren Größe wurde durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit abgeschätzt (aufsetzen eines Meßkopfes auf die Betonoberfläche; Elektroden bestanden aus Madenschrauben die im Abstand von einem Zentimeter angeordnet waren). Der Umrechnung der gemessenen Leitfähigkeit bzw. des Widerstands liegen Messungen an Eichkörpern gleicher Betonzusammensetzung und bekannter Feuchte zugrunde. Da nur ein Anhaltswert für die sich einstellende Feuchte ermittelt werden soll, wird auf weitere Einzelheiten dieser Messungen nicht eingegangen. Der Verlauf des Feuchtegehalts während der Beregnungszeit ist geschätzt. Insgesamt sind die Feuchtegehalte auch am Ende der Trocknung sehr hoch, so daß insgesamt sehr feuchte Bedingungen vorliegen, die in Zusammenhang mit den erhöhten Temperaturen zu einer verstärkten Nachhydratation und einer Behinderung der Karbonatisierung führen. Auch die innerhalb eines kurzen Zeitraums von 30 Minuten auftretenden Temperaturunterschiede in der Betonoberfläche von $\Delta T \approx 70$ °C stellen einen Wert dar, der in der Natur nur selten anzutreffen sein dürfte (Schlagregen auf eine durch Sonnenschein aufgeheizte Wand). Die zyklische Wiederholung dieses relativ seltenen natürlichen Witterungsereignisses stellt somit den Hauptfaktor der Zeitraffung dar.

Beurteilt werden die eingetretenen Zeitraffungseffekte dieser Prüfserie an Hand der feststellbaren Veränderungen der Porenradienverteilung. Die Zyklenzahl kann dabei mit der Beanspruchungsdauer gleichgesetzt werden. Maxi-

mal wurden 8000 Zyklen aufgebracht. Dies entspricht einer Versuchsdauer von 4000 h oder ca. 170 Tagen. Berücksichtigt man außerdem noch die Zeiten für den Ein- und Ausbau der Prüfkörper und die Entnahme der Bohrkerne sowie deren anschließendes Verschließen mit Mörtel, so ergibt sich eine Gesamtprüfdauer von mehr als einem halben Jahr.

Da, wie die Ergebnisse der Auswertung zeigen werden (siehe Abschnitt D), die Einwirkungen dieser Prüfserie zu einer wesentlichen Verbesserung der Betongüte führen (kontinuierliche Abnahme der Porosität und Verfeinerung der Porenradialverteilung in allen untersuchten Schichten bis zu einer Tiefe von 50 mm), wurden die Beanspruchungen in einer zweiten Prüfserie folgendermaßen verschärft:

- 3 minütige Beregnung
- 21 minütige Trocknung.

Der Einfluß dieser wesentlich trockeneren Bedingungen auf die Dichtigkeit des Betons wird an Hand der Eigenschaften kapillarer Wasseraufnahme sowie Porosität nach Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum untersucht. Der Feuchtegehalt für den Probekörper der Wand A ist im Bild B17 wiedergegeben. Für die Messungen wurde ein Feuchtemeßgerät der Fa. Doser verwendet, das eine Direktablesung des Feuchtegehalts ermöglicht. Wiedergegeben sind die mittleren Werte mehrerer Zyklen, nachdem mindestens 250 Zyklen aufgebracht worden waren. (Temperaturmessungen wurden nicht durchgeführt, da keine signifikanten Unterschiede zu den Verhältnissen der 1. Prüfserie zu erwarten sind.) Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung insgesamt trockenerer Verhältnisse.

Auch hier wurden maximal 8000 Zyklen aufgebracht. Auf Grund der geringeren Zyklendauer von 24 Minuten gegenüber 30 Minuten betrug die eigentliche Versuchsdauer ca. 130 Tage.

Die Prüfung von je einem Kleinkörper je Wand A, B und C in beiden Prüfserien dauerte somit über 2 Jahre. Wiederholungen der Bewitterungsversuche an einem zweiten Versuchskörper waren deshalb nicht möglich.

Auswertung: Je nach der Baustoffeigenschaft, an Hand der die Auswirkungen einer künstlichen Bewitterung beurteilt werden sollen, sind in einem ersten

Schritt die dafür erforderlichen Methoden anzuwenden. In einem zweiten Schritt ist die zeitliche Entwicklung dieser Eigenschaften, mit derjenigen infolge einer natürlichen Witterungseinwirkung zu vergleichen. Für den Fall gleichartiger Veränderungen stellt der Quotient der in den beiden Beanspruchungsarten untersuchten Baustoffeigenschaft den Zeittraffungsfaktor dar. Er ist der Maßstab mit dem Beanspruchungsdauern des Versuchs (Zyklenzahl) in Einwirkungsdauern natürlicher Bewitterung transformiert werden können. Für den Fall, daß nach einer bestimmten Zyklenanzahl die Dauerhaftigkeit beendet ist, wäre die Umrechnung dieser Zyklenzahl die Angabe der Dauerhaftigkeit. Darüberhinaus ist ein relativer Vergleich der untersuchten Betone möglich. Die Aufstellung einer Rangordnung der Eigenschaften vor Bewitterungsbeginn und die Beobachtung, ob sich an dieser Rangordnung bzw. den Abständen dieser Rangordnung mit zunehmender Versuchsdauer etwas ändert, ergibt die Möglichkeit die Eignung eines Betons im Vergleich zu anderen Betonen zu beurteilen.

Anwendungsgrenzen:

1. Die zyklische Wiederholung systematisierter Witterungseinflüsse, in einer Größenordnung die maximalen Naturereignissen entspricht, führt nicht zwangsläufig zu den Verwitterungs- bzw. Alterungseffekten, die einen Abbau der Dauerhaftigkeit darstellen. Die eintretenden Effekte sind nur teilweise mit denen natürlicher Einwirkung vergleichbar und nicht dauerhaftigkeitsrelevant wenn sie Karbonatisierungen ausschließen.
2. Wenn die Dauerhaftigkeit mit dem Erreichen einer bestimmten Karbonatisierungstiefe erschöpft ist, diese aber infolge künstlicher Bewitterung nicht nennenswert zunimmt, kann

a) keine Prognose des weiteren Karbonatisierungsverlaufes

b) kein Zeittraffungsfaktor

ermittelt werden. Erkenntnisse aus den Zeittraffungsversuchen beschränken sich somit auf einen relativen Vergleich der untersuchten Betone unter der Einwirkung eines künstlichen Klimas.

4. ÜBERSICHT ÜBER DIE VERSUCHSPLANUNG UND DEN VERSUCHSUMFANG

4.1 Gliederungskriterien

Die in den folgenden Unterabschnitten wiedergegebenen Prüfpläne orientieren sich an den Versuchszielen nach Tab. B1. Die zu ihrer Erreichung erforderlichen Prüfkörper, Prüfmethoden und der Zeitplan der durchzuführenden Prüfungen werden je für sich entwickelt. Eine Gesamtübersicht über alle durchgeführten Versuche enthält Tab. B13.

4.2 Feststellung von Porosität und Dichtigkeit (Wände A - D)

Die Porosität und Dichtigkeit sowie deren zeitliche Veränderung werden an aus Bohrkernen hergestellten Proben ermittelt. Die Entnahme der Bohrkern erstreckte sich auf einen Zeitraum von ca. 3 Jahren (siehe Bild B2 und Tab. B14). Insgesamt wurden 70 Bohrkern gezogen. Mit Ausnahme der Wand C, die beim Rücktransport von der Bohrkernentnahme zum Betonalter von 400 Tagen zerbrach, und für weitere Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung stand, wurden den im Freien aufgestellten Wänden ca. doppelt so viele Kerne entnommen wie den Laborwänden. Innerhalb jeder Lagerungsart verteilt sich die Bohrkernanzahl ungefähr gleichmäßig auf alle Wände. Je die Hälfte aller Bohrkern entstammt einer der beiden Nachbehandlungsarten. Außerdem wurde darauf geachtet, die Bohrkern je zur Hälfte aus der unteren bzw. der oberen Wandhälfte zu entnehmen. Die Auswahl der Bohrkern erfolgte zufällig.

Die Bohrkern wurden am Tag der Entnahme in die vorgesehenen Proben zersägt und bis zur Prüfung in Exsikkatoren bzw. bei 105 °C im Trockenschrank gelagert. Durch den Wasserentzug wurden Hydratation und Karbonatisierung gestoppt.

Der Prüfumfang zu den einzelnen Versuchstechniken ist getrennt für nachbehandelte und nicht nachbehandelte Wandhälften den Tabellen B15 bis B21 zu entnehmen. Die Anzahl der Versuche pro Versuchsart, Alter und Wandtiefe ist zwangsläufig gering. Unter Beachtung der zu erwartenden Materialstreuung läßt sich bereits jetzt feststellen, daß nicht alle Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen als signifikant nachweisbar sein werden (siehe auch Abschnitt B5).

Die Probenformen und -größen sind in den Bildern B18 bis B21 dargestellt. Die Bohrkernaufteilung ist nicht für alle Entnahmealter gleich. Die zeitlichen Abstände zwischen den Entnahmeterminen vergrößern sich mit zunehmendem Betonalter. Hierdurch soll folgenden Umständen Rechnung getragen werden:

1. Bei dem hier verwendeten frühhochfesten Portlandzement ist die Hydratation bis zum Betonalter von 90 Tagen i. w. abgeschlossen.
2. Bei den hier gewählten Betonrezepturen und Nachbehandlungen ist eine merkliche Karbonatisierung frühestens nach ca. 400 Tagen zu erwarten.
3. Zur Abgrenzung der Tiefe bis zu der die Witterung die Eigenschaften und den Zustand des Betons beeinflusst, werden mit zunehmendem Alter mehr Tiefenbereiche untersucht als im jüngeren Alter.

4.3 Eignungsnachweis der Versuchstechniken (Wände I - VIII)

An Bohrkernen aus den Wänden I - VIII und daraus hergestellten Proben werden umfangreiche Untersuchungen zur Materialstreuung für die hier untersuchten Eigenschaften durchgeführt. Die Entnahme der Bohrkern erfolgt zu den Betonalters 28, 90, 180 und 360 Tage. Die Lage der Bohrkern ist Bild B4 zu entnehmen. Pro Wand wurden 36 Bohrkern entnommen (weiteres vorgehen analog Abschnitt B/4.2). Einen Überblick über den Versuchsumfang geben die Tabellen B22 und B23. Form und Größe der Proben sind den Bildern B22 bis B25 zu entnehmen.

Die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe erfolgt an den Teilen V und K, unmittelbar nach Abschluß des jeweils vorlaufenden Versuches. Auf deren Ergebnis wird in diesem Bericht nicht eingegangen.

Auf die Wiedergabe der Versuchsergebnisse im Einzelnen wird weitestgehend verzichtet. Da Unterschiede in den Versuchsergebnissen für Proben unterschiedlich dicker Betondeckung und eine zeitliche Entwicklung nicht erkennbar sind, werden in der Regel für die Berechnung der Materialstreuung die Werte aller Altersstufen und aller Betondeckungen zusammen betrachtet (näheres siehe Abschn. B/5).

4.4 Porosität und Dichtigkeit bestehender Bauwerke

Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen die Beckumer Versuchshäuser. Aus Tab. B24 ist die Lage der entnommenen Bohrkerne zu ersehen. Der Sägeplan zur Gewinnung der für die verschiedenen Versuche erforderlichen Proben ist Bild B26 zu entnehmen. Bis zum Prüfbeginn lagerten die Proben im Exsikkator. Eine Übersicht über die Versuche gibt Tab. B25 für die Laboruntersuchungen und Tab. B26 für die Bauwerksversuche. Die Lage der ISA-Meßstellen ist Bild B6 zu entnehmen.

Entsprechende Angaben zur Instituts- und Kühlhauswand sind Tab. B27 zu entnehmen. Die Proben entsprechen bisherigen Angaben.

4.5 Untersuchung der Auswirkungen einer zeitraffenden künstlichen Bewitterung

Zur Feststellung der Auswirkungen einer künstlichen Bewitterung auf die Eigenschaften und den Zustand oberflächennaher Betonzonen werden die Kleinkörper wechselweise einer Beregnung und Trocknung unterworfen. Die Dauer dieser Phasen wurde variiert (näheres siehe Abschn. B/3.7).

Nach bestimmten Beanspruchungsdauern, ausgedrückt durch die Zyklenzahl, sowie unmittelbar vor Beginn der Bewitterung wurden den Versuchskörpern Kleinbohrkerne \varnothing 20 mm bzw. \varnothing 50 mm bis zu einer Tiefe von ca. 50 mm entnommen.

Für die Untersuchungen der 1. Prüfserie wurden in Abstufungen von ca. 10 mm daraus Proben für die Quecksilberdruckporosimetrie hergestellt, und zu den Zyklenzahlen 0, 1000, 3000, 4000, 5000 und 8000 Porenradienverteilungen bestimmt (Versuchsumfang siehe Tab. B28). Untersucht wurden Kleinkörper zugehörig zu den Wänden A, B und C. Da Wand D in der Zusammensetzung mit Wand C identisch ist, sind für Wand D keine Kleinkörper hergestellt worden. Auf eine Darstellung der Lage der entnommenen Bohrkerne, sowie der Bohrkernaufteilung kann verzichtet werden. In einer zweiten Prüfserie mit geänderter Beanspruchung (Regendauer drastisch verkürzt), wurden die Eigenschaften der kapillaren Wasseraufnahme und die Gesamtporosität gemessen (Versuchsumfang siehe Tab. B29).

Da die Oberfläche der Versuchskörper nur 35 x 35 cm beträgt, konnten nicht zu mindestens fünf verschiedenen Zyklenzahlen soviel Proben entnommen werden, um alle drei Versuchstechniken gleichzeitig anzuwenden. Die Bohrkernentnahme stellt zudem eine Störung der Oberfläche dar. Deshalb wurden die Bohrkernentnahmestellen der verschiedenen Untersuchungszeitpunkte so weit wie möglich voneinander entfernt, ohne dabei in den Randbereich des Versuchskörpers zu gelangen.

5. ERGEBNIS DER EIGNUNGSVERSUCHE

5.1 Überblick

Zur wirklichkeitsnahen Vorhersage der Dauerhaftigkeit mit theoretischen Modellen sind Angaben zur Streuung und Verteilung jener Variablen notwendig, die im Modell als Eingangsgrößen auftreten. Hierzu sollen Anhaltswerte durch Auswertung der Eignungsversuche gewonnen werden. Um Anhaltswerte kann es sich schon deshalb nur handeln, weil die statistischen Parameter der Variablen vom Stichprobenumfang und den Untersuchungsbedingungen abhängen. Damit sind die ermittelten Werte nicht unmittelbar verallgemeinerbar, sie beschränken sich auf die zu erwartende Größenordnung der statistischen Parameter. Aus den Vorbemerkungen von Abschnitt 2.1 ist ersichtlich, daß die Prüfstreuung (Streuung des Meßverfahrens an sich) vermutlich gegenüber der Materialstreuung (Streuung der Betoneigenschaften) vernachlässigbar ist. Die Materialstreuung setzt sich i. w. aus folgenden Anteilen zusammen:

- Streuung der Eigenschaften der Betonkomponenten
- Streuung der Betonzusammensetzung
- Streuung infolge des Herstellprozesses
- Streuung der Nachbehandlung und der Erhärtingsbedingungen (Mikroklima der Betonoberfläche)
- Bei Bauwerksmessungen: Streuung der den Prüfterminen vorausgehenden Witterungsbedingungen.

Folgende Versuche werden der statistischen Analyse unterzogen:

- Laborversuche zur kapillaren Wasserleitung
- Diffusionsversuche
- Versuche zur Porositätsbestimmung mittels Wassersättigung
- ISA-Versuche.

Geklärt werden soll dabei (siehe Abschnitt B/5.2):

- a) Größe der Prüfstreuung
- b) Größe der Materialstreuung und Klärung der Abhängigkeit der Materialstreuung von betontechnologischen Parametern (Betonzusammensetzung, Nachbehandlung, Wandtiefe, Betonalter, usw.)
- c) Lassen sich die beobachteten Streuungen durch eine Normalverteilung beschreiben?

Die Angaben zur Materialstreuung werden an Hand von Proben, die den Wänden I - VIII entnommen wurden getroffen. Angaben über den Umfang der Untersuchungen, die Lage der Stellen der Probenentnahme und das Probenalter, getrennt nach den verschiedenen Versuchstechniken, sind Tabelle B30 zu entnehmen.

5.2 Eignungsversuche der einzelnen Meßtechniken

5.2.1 Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme

5.2.1.1 Prüfstreuung

Zur Ermittlung der Prüfstreuung wurden folgende Versuche durchgeführt:

- a) Überprüfung der Genauigkeit der Gewichtsermittlung der Wägezellen. Laut Herstellerangaben beträgt der maximale Fehler der Wägezellen 0,05 % der Maximallast. Dies sind $\Delta g \leq 0,05 \cdot 5 \text{ kg}/100 = 2,5 \text{ g}$.

Die Auflösung des Verstärkers wurde so gewählt, daß 1 digit = 0,1325 g entspricht. Somit ist die Genauigkeit der Gewichtsermittlung von vornherein auf dieses Maß beschränkt.

Bei Anhängung von Proben mit bekanntem und konstantem Gewicht ergab sich folgendes Ergebnis (Gewichte so gewählt, wie sie dem Bereich der späteren Betongewichte entsprechen):

Proben- gewicht	Anzeige der Wägezellen	Differenz	$\frac{\text{Differenz}}{\text{Probengewicht}} \cdot 100$
[g]	[g]	[g]	[%]
146,12	146,83	+ 0,71	0,49
226,27	225,65	- 0,62	- 0,27
299,14	298,53	- 0,61	- 0,20
			<hr/>
			$ f = 0,32$

- b) Überprüfung der Gleichheit der sechs hier eingesetzten Wägezellen und der zeitlichen Konstanz der Meßergebnisse

Bei den Eignungsversuchen wurden die Wägezellen über einen Zeitraum von ca. 2,5 Tagen durch Anhängen konstanter Gewichte überprüft. Während dieses Testzeitraums wurde alle 2 Stunden das Gewicht registriert. In Tab. B31 sind die Ergebnisse getrennt für jede der sechs Wägezellen wiedergegeben. Zwischen dem Zeitpunkt des Anhängens der Gewichte und dem Beginn der Aufzeichnungen wurde ein Zeitraum von ca. 27 Stunden abgewartet.

Die statistische Analyse getrennt für jede Wägezelle ergibt die in Tab. B32 wiedergegebenen Ergebnisse. Im Mittel ergibt sich für alle sechs Wägezellen eine Standardabweichung von $s = 2,54 \text{ digits} = 0,34 \text{ g}$ bzw. ein Variationskoeffizient von $v = 0,42 \%$. Auffällig ist, daß für vier der sechs Wägezellen die Werte nicht normalverteilt sind.

Des weiteren können an Hand der in Tab. B31 angegebenen Meßwerten die beiden folgenden Hypothesen überprüft werden:

Hypothese 1: Es besteht kein Einfluß der verwendeten Wägezellen auf das Meßergebnis (alle sechs Wägezellen sind gleichwertig, keine signifikanten Unterschiede).

Hypothese 2: Es besteht kein Einfluß des Meßzeitpunktes auf das Meßergebnis (nicht zeitveränderliche, konstante Anzeige).

Wie die Auswertung (Tab. B33) zeigt, gibt es keinen Grund zur Ablehnung der beiden Hypothesen (Näheres zum gewählten Nachweisverfahren, der erforderlichen Rechenoperationen, der Bedeutung der Formelzeichen und zur Definition der Testgrößen siehe [B20]).

c) Vergleich der Meßmethode mit der Versuchsdurchführung nach DIN 52 617.

Für ca. 3 Jahre alte Proben aus mittleren Bohrkernstücken der Wände A - D wurden an benachbarten Stellen entnommenen Proben die Kennwerte des kapillaren Wassertransportes nach beiden Arten der Versuchsdurchführung geprüft. Die Ergebnisse sind in den Bildern B27 - B29 dargestellt.

Für die ebenfalls eingezeichneten Regressionsgeraden ergeben sich folgende Proportionalitätskonstanten:

$$A_{\text{DIN-Versuch}} = 0,9835 \cdot A_{\text{Wägezellen}}$$

$$\psi_{\text{DIN-Versuch}} = 1,0701 \cdot \psi_{\text{Wägezellen}}$$

$$B_{\text{DIN-Versuch}} = 0,778 \cdot B_{\text{Wägezellen}}$$

Führt man einen Test über die Verträglichkeit der Regressionskonstanten a mit dem vorgegebenen Sollwert von $a_{\text{Soll}} = 1,0$ durch [B20], so führt dies auf die Feststellungen:

1. Für den Wasseraufnahmekoeffizienten A und die Wasserkapazität ψ sind die Ergebnisse von an gleichwertigen Proben durchgeführten Versuchen nach der Methode von DIN 52 617 und den hier verwendeten Verfahren der Wägezellenmessung nicht signifikant voneinander verschieden.
2. Für den Wassereindringkoeffizienten B , der allerdings hier keine direkte Meßgröße darstellt, sondern aus den Größen Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität abgeleitet ist, ergeben sich dagegen nach beiden Verfahren signifikant verschiedene Ergebnisse, so daß auf die Verwendung dieser Größe im folgenden verzichtet wird.
3. Auffällig ist auch hier die große Streuung der Meßwerte, Bilder B27 - B29 (weiteres siehe Abschnitt 5.2.1.2).

4. Im Mittel ist die Genauigkeit der Wägezellenmethode mit derjenigen des Meßverfahrens nach DIN 52 617 vergleichbar, so daß keine Bedenken gegen die Anwendung dieser Methode bestehen.

5.2.1.2 Materialstreuung

Für die drei Kennwerte des kapillaren Wassertransports sind in den Bildern B30 - B33 jeweils die Standardabweichung und der Variationskoeffizient in Abhängigkeit des w/z-Wertes dargestellt.

Wasseraufnahmekoeffizient (Bild B30 und B31):

Die Ergebnisse für die nachbehandelten Wände sind in Bild B30 und jene für die nicht nachbehandelten Wände in Bild B31 dargestellt. Dabei zeigt sich:

1. Für die Proben des gesamten Untersuchungszeitraums (Betonalter bis zu 360 Tage):
 - a) daß weder die Standardabweichung noch der Variationskoeffizient konstant und unabhängig von der Betonzusammensetzung sind,
 - b) daß die Nachbehandlung zu einer deutlichen Verringerung der Streuung führt.
2. Die Aufspaltung der Werte in zwei Altersbereiche führt nicht in jedem Fall zu einer Abnahme der Streuung, so daß für deren Zustandekommen Faktoren, wie z.B. die Streuung der Zusammensetzung, Verdichtung, Nachbehandlung, etc. als Ursache zu nennen sind.
3. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 18 - 50 %.

Wasserkapazität (Bild B32):

Für die Darstellung der Abhängigkeit der Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten der Wasserkapazität vom w/z-Wert werden nur die Werte des gesamten Untersuchungszeitraums zusammengefaßt herangezogen.

Der Variationskoeffizient ist i.d.R. geringer als 20 %. Sowohl die Standardabweichung als auch der Variationskoeffizient scheinen vom w/z-Wert un-

abhängig zu sein. Wiederum weisen die nachbehandelten Wände geringere Streuungen auf als die nicht nachbehandelten (Ausnahme w/z-Wert von 0,85).

Wassereindringkoeffizient (Bild B33):

Der Wassereindringkoeffizient ist keine eigenständige Meßgröße. Er wird unter vereinfachenden Annahmen (Saugfront) aus dem Wasseraufnahmekoeffizient und der Wasserkapazität berechnet. Er wird nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

Gesamtwertung:

Während der Variationskoeffizient von 15 - 20 % der Wasserkapazität der von Druckfestigkeitsprüfungen zu erwartenden Größenordnung entspricht, weist der Variationskoeffizient des Wasseraufnahmekoeffizienten ca. doppelt so große Werte auf, wobei in beiden Fällen die Prüfstreuung gegenüber der Materialstreuung vernachlässigt werden kann. Einen Überblick über die absolute Größe der Streubreite geben die Bilder B34 - B36.

5.2.2 Diffusionsversuche

5.2.2.1 Prüfstreuung

Zur Ermittlung von Prüfeinflüssen auf das Meßergebnis wurden folgende Versuche durchgeführt:

1. Überprüfung der Dichtigkeit der Dichtungsmasse zwischen Probe und Alu-Schälchen.

Dazu werden anstelle der eigentlichen Proben auf die Alu-Schälchen mittels der Dichtungsmasse Blechdeckel aufgesetzt und dem Prüfvorgang unterzogen. Bei keiner dieser Prüfungen konnte für diese Eichkörper eine Gewichtsveränderung (durch CO₂-Aufnahme oder sonstige Einflüsse) festgestellt werden. Eine Verfälschung der Versuchsergebnisse infolge des Dichtungsmaterials ist somit auszuschließen.

2. Überprüfung des Einflusses der Prüfkörperentnahme aus der Truhe zur Wie- gung (Öffnung der Prüftruhe und Unterbrechung des Diffusionsvorgangs).

Im normalen Prüfablauf wurden die Probekörper einmal pro Arbeitstag ge-
wogen. Dieser Vorgang ist mit einer kurzzeitigen Unterbrechung des Dif-
fusionsvorgangs verbunden. Deshalb wurden in zwei getrennten, aufeinander-
folgenden Prüfserien an gleichalten Proben, die aus nebeneinanderlie-
genden Zonen von Reststücken des Bohrkerninneren entnommen wurden, un-
terschiedliche Prüfabläufe durchgeführt. Während bei der ersten Prüfse-
rie die Wiegung der Proben einmal pro Tag erfolgte, wurden die Proben
der zweiten Prüfserie nur zu Beginn und am Ende einer fünftägigen Einla-
gerungszeit gewogen. (Beiden Prüfabläufen ging jeweils ein Zeitraum von
ca. 3 Tagen Einlagerung voraus, so daß jeweils stationäre Zustände vor-
lagen). Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Bild B37 aufgetragen. Es
zeigt sich, daß i.M. aller Proben die Wiegung einmal pro Tag gegenüber
dem Vorgang ungestörter Diffusion über den Zeitraum von 5 Tagen nicht
auf signifikant andere Ergebnisse führt, auch wenn eine Streuung der
Einzelwert gegeben ist.

3. Überprüfung der CO₂-Konzentration in der Prüftruhe.

Der Sollwert der CO₂-Konzentration in der Prüftruhe wurde zu 10 Vol.-%
gewählt. Bei drei Testversuchen wurde das Steuersignal der Regulierung
der Gaskonzentration auf einem x-y-Schreiber registriert. Die Auswertung
dieser Aufzeichnungen ergaben i.M. eine CO₂-Konzentration von
10,11 Vol.-% mit einer Standardabweichung von $s = 1,11$ Vol.-% bzw. einen
Variationskoeffizienten von 10,98 %. Im Mittel wurde somit der Sollwert
der CO₂-Konzentration eingehalten.

Darüberhinaus wurde auch bei den eigentlichen Messungen die Gaskonzen-
tration kontrolliert. Eine statistische Auswertung dieser Aufzeichnungen
erfolgte nicht, da keine größeren Abweichungen erkennbar waren.

Die Beeinträchtigung der Versuchsergebnisse durch die hier untersuchten
Hauptfehler, ist somit vernachlässigbar. Für den Fall der Diffusionsmes-
sungen werden die beobachteten Streuungen als reine Materialstreuung be-
trachtet.

5.2.2.2 Materialstreuung

In den Bildern B38 - B41 sind für den Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des w/z-Wertes die Standardabweichung und der Variationskoeffizient aufgetragen. Dazu ist zunächst zwischen den Ergebnissen der Proben aus dem Wandmittenbereich (Bilder B39 und B41), und denen aus der Betondeckung (Bilder B38 und B40), zu unterscheiden. Darüber hinaus sind wiederum die nachbehandelten (Bild B38 und B39) und die nicht nachbehandelten Wände (Bild B40 und B41) getrennt dargestellt, wobei die unterschiedlichen Kurven zum einen für die Ergebnisse aller untersuchten Altersstufen und zum anderen nur für die Proben der Alter 180 und 360 Tage gelten. Dabei führt auch hier die Eingrenzung des Altersbereichs nicht unmittelbar zu einer Abnahme der Streuung. Auch beim Vergleich der Probenentnahmeorte und der Nachbehandlungsarten sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Der Variationskoeffizient liegt analog zu dem des Wasseraufnahmekoeffizienten bei 20 - 50 %. Während die Standardabweichung mit zunehmendem w/z-Wert ebenfalls zunimmt, ergibt sich für den Variationskoeffizienten in vielen Fällen keine eindeutige funktionale Abhängigkeit. Die Bilder B42 und B43 zeigen die absolute Streubreite der Werte.

5.2.3 Versuche zur Porositätsbestimmung mittels Wassersättigung

Die Anforderungen an die Prüfgeräte sind in [B12] geregelt. Hier wurden Einrichtungen benutzt, die diese Anforderungen erfüllen. Weitere Versuche zur Feststellung des Einflusses von Prüffehlern wurden deshalb nicht durchgeführt.

Wie die Bilder B44 - B47 zeigen, ist dies gerechtfertigt, da der Variationskoeffizient der füllbaren Porosität bzw. der Gesamtporosität ca. 10 % beträgt. Nachbehandelte Wände zeigen eine noch etwas geringere Streuung als nicht nachbehandelte Wände. Außerdem ist der Variationskoeffizient unabhängig vom w/z-Wert (Standardabweichung nimmt entsprechend mit steigendem w/z-Wert zu). Es wurde jeweils die Gesamtheit der Proben aller untersuchten Altersstufen betrachtet ($n = 18$).

Der Variationskoeffizient für Dichtigkeitsmessungen ist somit ca. 3 mal größer als derjenige der Porositätsmessungen. Dies ist dann erklärbar, wenn

die Dichtigkeit außer von der Porosität, noch von weiteren Größen, wie z.B. der Porenradienverteilung und der Struktur des Porensystems beeinflusst wird. Die weiteren Untersuchungen werden dies bestätigen und zeigen, daß Porenradienverteilungen und Faktoren die die Struktur des Porensystems beschreiben, streuende Größen sind (siehe Berichtsteil C). Somit ergeben sich offenbar für die Grundeigenschaften des Betons (Druckfestigkeit und Porosität) unter definierten Herstellungsbedingungen, Streuungen von vergleichsweise geringer Größe, für alle Eigenschaften (hier Dichtigkeit), die außer von diesen Grundgrößen noch von weiteren Parametern abhängen, dagegen beträchtlich größere Streuungen.

5.2.4 ISA-Versuche

5.2.4.1 Prüfstreuung

Dem Einfluß von folgenden Größen der Versuchseinrichtung und -durchführung wurde nachgegangen:

1. Abdichtung der Meßkappe auf der Betonoberfläche

Als Abdichtungsmaterial zwischen der Meßkappe und der Wandoberfläche wurde Kitt verwendet. Die Eignung dieses Materials wurde dadurch überprüft, indem die Meßkappe auf einer Metallplatte angebracht und dann mit Wasser gefüllt wurde. Nach wasserdichtem Verschließen der Einlauf- bzw. Auslauföffnung der Meßkappe wurde die Platte ca. 10 Tage senkrecht gelagert. Pro Tag erfolgte mindestens eine Wiegung des Systems Platte plus Kappe. Dabei konnten keine Gewichtsveränderungen festgestellt werden (die Ablesemöglichkeit der Waage betrug 0,1 g). Zur Simulation der Oberflächenrauigkeit natürlich bewitterter Betonoberflächen wurde in einem anschließenden Versuch die Metallplatte mit einem wasserfesten und wasserundurchlässigen Kleber bestrichen und in die Klebschicht Sand mit 4 mm Größtkorn eingestreut. Bei Wiederholung des obigen Versuches auf dieser rauhen Oberfläche ergaben sich ebenfalls keine Undichtigkeiten.

2. Die Güte und Gleichmäßigkeit der Meßeinrichtung an sich wurde dadurch überprüft, daß der in BS 1881, pt. 5 beschriebene Eichvorgang in regel-

mäßigen Abständen wiederholt wurde. Hierbei ergaben sich keine signifikanten Veränderungen.

3. Wettersituation zum Zeitpunkt der Messungen

Dazu wurden an zwei der acht Wände (Wand III und V) im Laufe eines Tages und nur auf dem Oberflächenbereich der Betondeckung von $c = 2$ cm jeweils neun Messungen auf neun verschiedenen Stellen durchgeführt. Wohl ist davon auszugehen, daß nicht exakt die gleichen Wetterbedingungen für jede Meßung vorliegen. Aber die Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchte sind viel geringer, als infolge jahreszeitlicher Wetterwechsel. Es kann erwartet werden, daß die Streuung der Meßwerte geringer ausfällt, als bei Messungen, die sich über den Zeitraum eines Jahres verteilen, wie sie im Abschn. B/5.2.4.2 behandelt werden. Die Versuchsergebnisse (siehe Tab. B34) bestätigen diese Vermutung jedoch nicht. Die Variationskoeffizienten von i.M. 46,1 % für Wand III und 22,0 % für Wand V liegen nicht unter den Werten der im folgenden behandelten Materialstreuung.

Insgesamt ergibt sich auch für die ISA-Messungen ein vernachlässigbarer Einfluß der Prüfmethode auf die Streuung der Meßergebnisse, wenn frühestens zwei Tage nach dem letzten Regenfall gemessen wird.

5.2.4.2 Materialstreuung

Für die ISA-Meßwerte des Betonalters $90 \text{ Tage} \leq t \leq 360 \text{ Tage}$ sind in den Bildern B48 und B49 die Standardabweichung und der Variationskoeffizient in Abhängigkeit des w/z -Werts wiedergegeben. Beide sind vom w/z -Wert abhängig: Während die Standardabweichung mit zunehmendem w/z -Wert ebenfalls zunimmt, ist der Variationskoeffizient umso kleiner, je größer der w/z -Wert ist. Insbesondere für w/z -Werte kleiner als 0,67 zeigt sich deutlich ein positiver Einfluß der Nachbehandlung auf die 10-Minuten-Werte (Die Ablesungen zu späteren Zeitpunkten sind dagegen eher unbeeinflusst von der Nachbehandlung).

Mit zunehmender Ablesedauer verringert sich die Standardabweichung, da der ISA-Wert mit zunehmender Versuchsdauer aus physikalischen Gründen kleiner werden muß.

Analog zu den Messungen des Wasseraufnahmekoeffizienten bewegt sich der Variationskoeffizient in der Größenordnung von ca. 30 %. Für die Wände mit dem w/z-Wert 0,5 sind die Meßwerte nur wenig von Null verschieden, so daß Ablesungen für diese Wände an die Grenzen der hier verwendeten Meßeinrichtung stoßen (z.T. sind Standardabweichung und Meßwert von gleicher Größenordnung und die Unterschiede zwischen dichten Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung nicht mehr meßbar). Für besonders dichte Betone kann deshalb eine Veränderung der Meßeinrichtung erforderlich werden (entweder Vergrößerung der Prüffläche unter der Meßkappe oder Verringerung des Durchmessers der Meßkapillare bzw. beide Maßnahmen zusammen), die zu einer höheren Auflösung des Meßwerts führt, auch wenn der praktische Nutzen einer solchen Maßnahme gering sein dürfte.

Die Bilder B50 bis B52 geben die bei diesen Versuchen beobachtete Streubreite wieder. Auch dabei wurden nur die Messungen die zu einem Betonalter größer 90 Tage durchgeführt wurden berücksichtigt.

5.3 Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Es war nicht das Ziel dieser Untersuchungen Aussagen zur grundsätzlichen Einsetzbarkeit der hier benutzten Versuchstechniken zu liefern, da diese gewährleistet ist. Die Meßergebnisse erlauben es nicht, eine Aussage zur Eignung der Meßverfahren für die Dauerhaftigkeitsbeurteilung zu erhalten (diese ergibt sich in erster Linie aus dem physikalisch-werkstoffwissenschaftlichen Zusammenhang zwischen Meßgröße und Dauerhaftigkeit). Vielmehr werden Informationen über die Aussagekraft der Meßergebnisse angestrebt (siehe Abschnitt 5.1 und 5.2). Darüberhinaus sind Festlegungen zum Prüfumfang (Anzahl der Versuche pro Wandtiefe und Betonalter) notwendig. Dieser ist allerdings nach den hier vorliegenden Ergebnissen z.T. größer als im Rahmen dieses Vorhabens realisierbar (siehe Bild B53).

Die Ergebnisse zeigen auch, daß die Betonage von Wandabschnitten unter baustellenähnlichen Verhältnissen und unter Teilsimulation von Einflüssen die zu einer Beeinträchtigung der Betonqualität führen, sich in einer entsprechend großen Streuung der Versuchsergebnisse äußern. Dies betrifft in erster Linie die Dichtigkeitseigenschaften mit Variationskoeffizienten von mehr als 30 % und nicht so sehr die Porosität (ermittelt durch Wassersätti-

gung) mit Variationskoeffizienten von ca. 10 % (Gründe für die Unterschiede siehe Abschnitt 5.2.3).

Die Größe der Streuung wird von der Betonzusammensetzung, wobei hier nur der Einfluß des w/z-Wertes untersucht wurde, und der Nachbehandlung des Betons beeinflusst. Generell gilt, daß die Streuung umso geringer ausfällt, je niedriger der w/z-Wert und je intensiver die Nachbehandlung ist.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [B1] Hinrichsmeyer, K.; Abdul-Maula, S.; Diederichs, U.; Rostásy, F.S.: Quecksilberdruckporosimetrie - Ringversuche an erhärteten Zementstein. Forschungsbericht, iBMB, TU Braunschweig, 1988.
- [B2] Schönlin, K.: Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation, Karlsruhe, 1989.
- [B3] Paulmann, K.; Rostásy, F.S.: Praxisnahes Verfahren zur Beurteilung der Dichtigkeit oberflächennaher Betonschichten im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit. Forschungsbericht, iBMB, TU Braunschweig, 1990.
- [B4] Dhir, R.K.; Hewlett, P.C.; Chan, Y.N.: Near surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 141, p. 183/195, 1987.
- [B5] Figg, J.W.: Methods of measuring the air and water permeability of concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 85, p. 213/219, 1973.
- [B6] Concrete Society: Permeability of concrete and its control. Papers of a one day Conference, London, 12. Dec. 1985.
- [B7] Zement - Taschenbuch. VDZ, Wiesbaden, 48. Ausgabe, 1984.
- [B8] Litvan, G.G.; Meyer, A.: Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. Second International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, 21.-25. April, 1986.

- [B9] Schröder, F.; Smolczyk, H.G.: Carbonation and protection against steel corrosion. Principal paper: Blast Furnace Slags and Slag cement. Proc. of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. 5, p. 188, 1968.
- [B10] Grube, H.; Krell, J.: Zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton. Beton 36, H. 3, S. 104/109, 1986.
- [B11] Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Dissertation, Braunschweig, 1987.
- [B12] Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt: Prüfungen der Wasserleitfähigkeit, der Frostbeständigkeit und der Frost-Tausalz-Beständigkeit. Richtlinien für die Versuchsdurchführung, 1985.
- [B13] Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Assessment of Durability of Concrete Surfaces. Durability of Non-Metalic Inorganic Building Materials. DFG-Abschlußkolloquium, Karlsruhe, 4.-5. 10. 1988.
- [B14] Kreijger, P.C.: The skin of concrete, composition and properties. Materials and Structures, Vol. 17, p. 275/283, 1984.
- [B15] Schwiete, H.E.; Ludwig, U.: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. Tonindustriezeitung 90 (1966), H. 12, S. 562/574.
- [B16] Gertis, K.; Kiehl, K.; Werner, H.; Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. Heft 258 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- [B17] Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Evaluation of On-site Conditions and Durability of Concrete Panels Exposed to Weather. IABSE-Symposium Durability of Structures, Lisbon, 6.-8. 9. 1989.
- [B18] Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Dichtigkeitsprüfung an Bauwerksbeton. Forschungsbericht, iBMB, TU Braunschweig, 1989.
- [B19] Pommersheim, J.; Clifton, J.: Prediction of concrete service life. Matériaux et Constructions, Vol. 18, No. 103, p. 21/30, 1985.

- [B20] Graf,U.; Henning,H.J.; Stange,K.: Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. 2. Auf., Berlin, 1966.

TABELLEN

TEIL B

Tab. B1: Übersicht über die Versuchsziele

Versuchskörper	Versuchsziele
Wände A - D (unbewehrt)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Studium der zeitlichen Entwicklung der Porosität und Dichtigkeit. 2. Ermittlung der Korrelation zwischen den Meßgrößen der eingesetzten Verfahren. 3. Einfluß verschieden intensiver Klimate (Witterungen) auf die Dauerhaftigkeit. 4. Aufstellung von Methoden und Modellen zur Prognose der Dauerhaftigkeit.
Wände I - VIII (bewehrt)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eignungsnachweis der Versuchstechniken. 2. Ergänzende Studien zur zeitlichen Entwicklung der Dichtigkeit.
"Alter Beton"	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abschätzung von Endwerten der zeitlichen Entwicklung von Porosität und Dichtigkeit. 2. Praxisgerechte Anwendung derjenigen Versuchsmethoden, deren Eignung nachgewiesen werden konnten. 3. Erste Anwendung des Modells zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit.

1) Untersuchungen zur Porosität nur stichprobenartig

Tab. B2: Zusammenstellung der Parametervariation der Wände A - D

Parameter	Wand			
	A	B	C	D
w/z-Wert [-]	0,5		0,7	
Zementgehalt [kg/m ³]	340	280	360	
Sieblinie (DIN 1045)	B16		C4	
Zuschlaggehalt [kg/m ³]	1840	1810	1590	
Mischungsverhältnis Z : G : W [Gew.-Teile]	1:5,4:0,5	1:6,5:0,7	1:4,4:0,7	
G/(W+Z)	3,6	3,8	2,6	
Zuschlaganteil [Gew.%]	78,3	79,2	72,2	
Zementleimanteil [Gew.%]	21,7	20,8	27,8	
Nachbehandlung	- keine - 7 Tage unter feuchten Tüchern und Folie			
Betonierdatum	Herbst 85			Früh-sommer 86
Beanspruchung	- ungeschützt im Freien (F) - Klimaraum (20°C, 65% r.F.)(L) - künstliche Bewitterung an zugehörigen Kleinkörpern (K)		- ungeschützt im Freien (F) - künstliche Bewitterung an zugehörigen Kleinkörpern (K)	
Nicht variierte Parameter	Zementart: PZ 35F Zuschlagart: Quarz Konsistenz: K2, a ≈ 40 cm Verdichtung: Rüttelflaschen und Schalungsrüttler Nachbehandlungsart: nur wie oben beschrieben Orientierung der im Freien aufgestellten Wände: Ausrichtung in Ost-West Richtung (Witterungsrichtung Nord-Süd)			

Tab. B 3: Betonzusammensetzung der Wände A-D.

Wand- bezeich- nung	Lage- rung	Betonzusammensetzung						Zusatz- mittel ¹⁾	Herstell- datum
		w/z-Wert	Gehalt Zement	Art	Gehalt Zuschlag	Art	Sieb- linie		
[-]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[]	[%Z.-geh.]	[-]
A	F ----- I	0,5	340	P735F	1844	quar- zitisch	B16	3,0	11.11.85
B	F ----- I	0,7	280	P735F	1810	quar- zitisch	B16	2,0	16.09.85
C	F ----- F	0,7	360	P735F	1591	quar- zitisch	C4 ²⁾	3,5	02.10.85
D	F ----- F	0,7	360	P735F	1591	quar- zitisch	C4 ²⁾	3,5	03.07.86

1) Fließmittel Sicotan BV 72

2) nur Korngruppe 0/2a nach DIN 4226

Tab. B 4: Frischbetoneigenschaften der Wände A-D

Wand- bezeich- nung	Frischbetonrohddichte		Konsistenz		LP-Gehalt
	Würfel	LP-Topf	Ausbreit- maß	Verdichtungs- maß	
[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[cm]	[cm]	[Vol.-%]
A	2410	-	38,0	-	-
B	2290	-	39,0	-	-
C	2310	2220	41,0	1,07	2,7
D	2310	2260	34,0	1,12	3,0

Tab. B 5: Übersicht über Art, Anzahl, Lagerung und Prüfabsicht der Begleit-
körper zu den Wänden A-D.

Art	Abmessung	Anzahl	Prüfung	Lagerung bis Prüfung	Prüfalter	Anzahl der Prüfungen
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[Tage]	[-]
Würfel	a=150	15	Druckfestig- keit	DIN 1048	28	3
				wie die Wände, Lagerung im Freien	2 7 28 90 bzw. 119	3 3 3 3
Zylinder	Ø 150 L=300	12	Spaltzug- festigkeit	Wasserbad	2 7 28 90 bzw. 119	3 3 3 3
Wasser- platten	b/h/d= 200/200/120	3	Wasserein- dringprüfung	DIN 1048	28	3
Kleinkörper in Styro- porschälung	b/h/d= 350/350/200	3	Zeit- raffungsver- suche	Labor 20/70	mehr als 1 Jahr	2

Tab. B6: Festbetoneigenschaften der Betone der Wände A-D

Wand- bezeich- nung	Lage- rung	Prüf- alter	Untersuchte Festigkeit			Wasser- eindring- tiefe	Betongüte DIN 1045		Festig- keits- klasse
			Druckfestigkeit Erhärtungs- würfel	Spaltzug- festigkeit Eignungs- würfel	Spaltzug- festigkeit		Wasserundurch- lässiger Beton	Ja	
[-]	[-]	[Tage]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[cm]			
A	F	2	27	-	2,3	-	x		B45
		7	45	-	2,9	-			
		28	49	67	3,4	0,8			
		119	56	-	3,3	-			
B	F	2	19	-	1,9	-	x		B35
		7	35	-	2,7	-			
		28	46	41	2,6	1,9			
		119	42	-	3,0	-			
C	F	2	-	-	-	-		x	B35
		7	29	-	2,1	-			
		28	37	43	2,4	2,4			
		119	37	-	2,2	-			
D	F	2	-	-	-	-		x	B25
		7	28	-	1,8	-			
		28	33	36	2,5	2,7			
		90	38	-	2,9	-			

Tab. B7: Übersicht über die Parametervariation der Wände I - VIII.

Parameter	Wand							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
w/z-Wert [-]	0,5		0,7		0,85		0,98	
Zementgehalt [kg/m ³]	330		290		230		215	
Zuschlaggehalt [kg/m ³]	1920		1810		1860 ¹⁾		1850 ²⁾	
Mischungsverhältnis Z:G:W [Gew.-Teile]	1,0:5,8:0,5		1,0:6,2:0,7		1,0:8,1:0,85		1,0:8,6:0,98	
G/(W+Z)	3,9		3,7		4,3		4,4	
Zuschlaganteil [Gew.%]	79,5		78,8		81,2		81,3	
Zementleimanteil [Gew.%]	20,5		21,2		18,8		18,7	
Nachbehandlung	- keine - 7 Tage unter feuchten Tüchern und Folie							
Betondeckung	c = 5 - 30 mm; in Schritten von 5 mm variiert							
Betonierdatum	27.07.87	10.08.87	19.08.87	02.09.87	14.09.87	28.09.87	23.11.87	16.12.87
Nicht variierte Parameter	Zementart: PZ35F Sieblinie: B/C 32 Zuschlagart: calzitisch Konsistenz: K2; a 40 cm Verdichtung: Rüttelflaschen und Schalungsrüttler Nachbehandlungsart: nur wie oben beschrieben Orientierung der im Freien aufgestellten Wände: Ausrichtung in Ost-West Richtung (Witterungsrichtung: Nord-Süd) Bewehrung: Nordseite: Einzelstäbe \varnothing 12; lichter Abstand: 20 mm Südseite: Q221, c = 15 mm							

1) einschließlich 60 kg Kalksteinmehl

2) einschließlich 90 kg Kalksteinmehl

Tab. B8: Übersicht über Art, Anzahl, Lagerung und Prüfabsicht der Begleitkörper der Wände I - VIII.

Art	Abmessung	Anzahl	Prüfung	Lagerung bis Prüfung	Prüfalter	Anzahl der Prüfungen
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[Tage]	[-]
Würfel	a = 150	12	Druckfestigkeit	DIN 1048	28	3
				wie die Wände	7 28 90	3 3 3
Zylinder	\varnothing = 150 L = 300	3	Spaltzugfestigkeit	DIN 1048	28	3
Wasserplatten	b/d/h = 200/200/120	3	Wassereindringprüfung	DIN 1048	28	3
Zylinder	\varnothing = 150 L = 350	1	E-Modul	DIN 1048	28	1
Platten mit einbetonierten Elektroden	b/d/h = 270/270/60	4	Eichkörper für den Zusammenhang: Feuchte - elekt. Widerstand	ca. 9 Monate Labor 20/70; dann Durchfeuchtung und Trocknung	< 400	4
Würfel	a = 300	3	Vergleichskörper zu den Wänden, die der Witterung ausgesetzt sind	wie die Wände	Über die Durchführung von Prüfungen an diesen Würfeln, wird auf Grund der Ergebnisse der Wandmessungen entschieden	
Platten in 5-seitiger Styroporschalung	b/h/d = 350/350/120	3	Vergleichskörper zu den Wänden, die im Labor gelagert werden	Labor bei 20/70; Nachbehandlung wie die Wände	ca. 360	1

Tab. B9: Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Wände I - VIII.

Mischungs- bzw. Wandbezeichnung	Anzahl der Wände	Anzahl der Teilmischungen pro Wandpaar	Betonmenge pro Betonage	Konsistenz		Rohdichte		Frischbetontemperatur	Luftporengehalt
				Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß	LP-Topf	Würfel		
[-]	[-]	[-]	[Liter]	[-]	[cm]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[°C]	[Vol. %]
I ^a I ^b	2	3	360	1,09	33,0	-	2380	-	2,10
II ^a II ^b	2	3	400	1,18	34,0	2350	2380	22,5	2,40
III ^a III ^b	2	4	300	-	38,0	-	2400	24,0	1,50
IV ^a IV ^b	2	4	285	-	39,0	2360	2390	23,0	1,45
V ^a V ^b	2	4	285	-	41,0	2340	2370	22,0	1,53
VI ^a VI ^b	2	4	285	-	42,0	2340	2390	20,0	1,45
VII ^a VII ^b	2	4	285	-	52,5	2350	2380	20,0	1,10
VIII ^a VIII ^b	2	4	285	-	50,0	2350	2380	17,0	1,10

Tab. B10: Betonzusammensetzung der Versuchshäuser in Beckum

Betontechnologischer Parameter	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
Betonierdatum	24.09.1963	08.10.1963	22.10.1963	17.09.1964
Betonierwetter: Lufttemperatur [°C] Feuchte, Wind	20,5 trocken; schwacher Wind aus südlicher Richtung	15,0 trocken; schwacher Wind aus östlicher Richtung	13,3 trocken; schwacher Wind aus nordöstl. Richtung	- trocken
Betonzusammensetzung: w/z-Wert [-]	0,60	0,45	0,54	0,58
Zementart [3]	PZ 275	HOZ 275	HOZ 375	HOZ 275
Zementgehalt [kg/m³]	300	300	300	300
Zuschlaggehalt [kg/m³]	1888	1889	1846	1886
Sieblinie [DIN 1045 alt]	E	E	E	E
Größtkorn [mm]	30	30	30	30
Zusatzstoffe	-	-	-	-
Zusatzmittel	-	-	-	-
Mischungsverhältnis: Z/G/W [Gew.-Teile]	1:6,3:0,60	1:6,3:0,45	1:6,2:0,54	1:6,3:0,58
G/(Z+W)	3,9	4,3	4,0	4,0
Zuschlaganteil [Gew. %]	80,0	81,2	80,0	79,9
Zementleimanteil [Gew. %]	20,0	18,8	20,0	20,1
Konsistenz	weich			
Verdichtung	Innenrüttler ø 50 mm			
Nachbehandlung	keine; Wände verbleiben 5 Tage in der Schalung			
Lagerung	ungeschützt im Freien			

Tab. B11: Frischbetoneigenschaften der Betone der Beckumer Versuchshäuser

Frischbetoneigenschaft	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
Mischer Ausbreitmaß [cm]	36,5	37,5	38,0	42,0
Einbau	38,0	37,5	38,0	42,0
Frischbetonroh- dichte [kg/m³]	2395	2415	2365	2360
Frischbeton- temperatur [°C]	15,0-17,5	16,0-18,0	20,2-20,8	-

Tab. B12: Zementanalyse für die zur Betonage der Versuchshäuser aus Beckum verwendeten Zemente.

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
Zementart	PZ	HOZ	HOZ	HOZ
Kurzbez. DIN 1164(alt)	PZ 275	HOZ 275	HOZ 375	HOZ 275
Chem. Zusammensetzung (gluhverlustfrei) [Gew. %]				
CaO	64,4	46,8	51,4	48,2
SiO ₂	22,4	27,6	28,1	27,9
Al ₂ O ₃	6,4	13,4	9,1	12,4
Fe ₂ O ₃	3,0	1,8	1,9	1,1
Mn ₂ O ₃	-	-	-	-
MgO	1,4	5,7	4,0	3,4
SO ₃	1,9	3,0	2,2	3,0
Hüttensandanteil	-	68,0	58,0	65-70
Sonstiges	-	1,2(Sulfid)	1,1(Sulfid)	1,1(Sulfid)
Phasenzusammensetzung der Klinkerminerale (nach Boque)				
C ₃ S	38,9			
C ₂ S	35,0			
C ₄ (A,F)	9,3			
C ₃ A	11,8			
freies CaO	1,2			
freies MgO	1,4			
CaSO ₄	3,3			
Weitere Eigenschaften: Spezifische Oberfläche nach Blaine [cm²/g]	2415	3445	4580	3687
Biegezug-/Druckfestigkeit [N/mm²] nach				
1 Tag	1,6/5,6	1,2/4,0	1,5/4,8	1,4/4,2
3 Tagen	3,8/15,2	3,0/13,2	3,4/13,6	3,8/12,4
7 Tagen	4,9/26,0	5,6/26,2	5,4/27,2	6,1/22,4
28 Tagen	8,0/48,4	8,3/44,8	7,8/45,2	9,0/41,2
90 Tagen	8,9/59,2	8,6/59,8	9,0/58,4	9,6/54,8
180 Tagen	8,9/61,2	7,8/64,8	/ -	10,1/60,8

Tab. B13: Übersicht über die Gesamtzahl der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Versuche (getrennt nach Versuchsarten und Versuchsobjekten)

Objekt	Gesamtzahl aller Versuche pro Versuchsart LABORVERSUCHE				BAUTEILVERSUCHE			Gesamt- zahl der Versuche pro Objekt
	Queck- silber- druck- poro.	Poro. Wasser- sättig- ung	CO2- Diffu- sion	Kap. Wasser- leitung	ISAT	Wasser- ein- dring- prüfung	Karbo- natisie- rungs- tiefe	
Wände A-D .	431	72	181	201	150	94	44	1173
Wände I-VIII	126	336	536	336	220	108	-	1662
Bestehende Bauwerke:								
- Beckum HS1-HS4	76	24	42	64	44	16	32	286
- Instituts- wand	4	-	4	8	3	-	2	21
- Kühlhaus- wand	2	9	24	9	-	-	17	61
Künstliche zeitgeraffte Bewitterung	127	22	-	18	-	-	12	179
Versuchsan- zahl pro Eigenschaft	766	463	787	636	417	218	107	3394

Tab. B14: Übersicht der Bohrkernentnahme der Wände A-D.

Wand	Nachbe- handlung		Nummer der Bohrkern- e die zum angegebenen Beton- alter [Tage] gezogen wurden						Anzahl der Bohr- kerne
	ja	nein	7	28	90 (120) ¹⁾	400	780 ²⁾ (700) ³⁾	960 ¹⁾ (1010) ⁴⁾	
AF	x		28 ; 69	27 ; 78	26	99	-	47	14
		x	23 ; 64	22 ; 73	21	91	-	52	
AL	x		28	-	27	87	-	57	8
		x	23	-	22	82	-	52	
BF	x		28 ; 69	27 ; 78	26	79	88	48	16
		x	23 ; 64	22 ; 73	21	71	33	43	
BL	x		28	-	27	88	-	57	8
		x	23	-	22	71	-	52	
C	x		28	-	26	76	-	-	6
		x	23	-	21	71	-	-	
D	x		17 ; 77	8 ; 68	6 ; 66	7 ; 78	28	-	18
		x	12 ; 72	3 ; 63	1 ; 61	11 ; 71	21	-	
Gesamtzahl			18	12	14	14	4	8	10

1) nur Wandpaar A

2) nur Wand BF

3) nur Wand D

4) nur Wandpaar B

Tab. B15: Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruckporosimetrie an Proben der nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; alle Proben wurden im Vakuum getrocknet) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruck- porosimetrie zum Betonalter [Tage]																					Gesamt- zahl der Versuche				
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾															
0 - 10	4	3	2	3	-	4	-	2	-	2	3	6	2	3	2	5	-	2	-	2	2	1	-	-	65	
	2	1		15	-	-		6	3	2		16	3	2		17	-	-		4	2	2		7		
10 - 20	3	3	2	3	-	4	-	3	-	2	3	6	2	3	2	5	-	2	-	2	2	2	-	-	65	
	2	1		14	-	-		7	3	2		16	2	2		16	-	-		4	2	2		8		
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-		
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2	2	2	-	-	14	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2	2	2		8		
Mitte	4	3	3	3	-	4	-	1	-	2	3	6	2	3	2	5	-	2	-	2	2	2	-	-	64	
	2	1		16	-	-		5	3	2		16	2	1		15	-	-		4	2	2		8		
Gesamtzahl	45		18		48		52		16		31		210													

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B16: Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruckporosimetrie an Proben der nicht nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; alle Proben wurden im Vakuum getrocknet) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruck- porosimetrie zum Betonalter [Tage]																				Gesamt- zahl der Versuche				
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾														
0 - 10	4	3	3	2	-	4	-	3	3	2	2	5	3	3	1	5	-	2	-	2	2	-	-	69	
	2	2	16	-	-	7	3	2	17	2	3	17	-	-	4	2	2	8							
10 - 20	4	3	3	3	-	4	-	3	3	2	3	5	2	3	2	4	-	2	-	2	2	2	-	-	69
	2	1	16	-	-	7	3	2	18	2	3	16	-	-	4	2	2	8							
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-						
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2	2	2	-	-	14	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	2	2	2	8						
Mitte	4	3	3	3	-	4	-	3	1	2	3	5	2	3	2	4	-	2	-	2	2	2	-	-	67
	2	1	16	-	-	7	3	2	16	3	2	16	-	-	4	2	2	8							
Gesamtzahl	48		21		51		53		16		32		221												

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B17a: Anzahl der Versuche zur CO₂-Diffusion an Proben der nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; vor Versuchsbeginn Trocknung der Proben bei 105°C) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der CO ₂ -Diffusionsversuche zum Beton- alter [Tage]														Gesamt- zahl der Versuche
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾				
0 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
> 40 und Wand- mitte	2	4	1	2	2	3	-	2	-	2	1	2	1	1	29
	-	1	10	-	-	7	-	2	7	1	1	5	-	-	
Gesamtzahl	10		7		7		5		-		-		29		

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B17b: Anzahl der Versuche zur CO₂-Diffusion an Proben der nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; vor Versuchsbeginn Vakuumtrocknung der Proben) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der CO ₂ -Diffusionsversuche zum Betonalter [Tage]														Gesamtzahl der Versuche									
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾													
0 - 10	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	6				
	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	3					
10 - 20	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	6			
	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	3					
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	1	-	1	1	1	-	-	8			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	1	1	-	4					
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	5			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	4					
> 40 und Wandmitte	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	4	-	2	-	5	5	5	-	-	35
	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	3	-	-	-	4	-	-	7	5	4	19			
Gesamtzahl	3		3		3		6		12		33		60											

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B18a: Anzahl der Versuche zur CO₂-Diffusion an Proben der nicht nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; vor Versuchsbeginn Trocknung der Proben bei 105°C) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der CO ₂ -Diffusionsversuche zum Beton- alter [Tage]														Gesamt- zahl der Versuche								
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾												
0 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
10 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
> 40 und Wand- mitte	2	3	2	2	2	4	-	2	-	2	1	2	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	30
	1	-	10	-	-	8	-	2	7	1	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Gesamtzahl	10		8		7		5		-		-		30										

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B18b: Anzahl der Versuche zur CO₂-Diffusion an Proben der nicht nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; vor Versuchsbeginn Vakuumtrocknung der Proben) der Wände A - D.

Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der CO ₂ -Diffusionsversuche zum Betonalter [Tage]														Gesamtzahl der Versuche				
	7		28		90 (120) ¹⁾		400		780 ²⁾ (700) ³⁾		960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾								
0 - 10	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	7		
	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	4			
10 - 20	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	7		
	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	4			
20 - 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	1	1	1	-	8	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2	1	1	4		
30 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	5	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	4		
> 40 und Wandmitte	-	-	1	-	-	1	-	1	1	-	-	-	4	-	1	5	5	-	35
	-	-	1	-	-	1	-	1	3	-	-	4	-	-	6	5	5	20	
Gesamtzahl	3		3		3		6		11		36		62						

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B19: Anzahl der Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme und Porositätsbestimmung an Proben der nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; alle Proben wurden im Vakuum getrocknet) der Wände A-D.

Versuchsart	Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der Versuche zum angegebenen Betonalter [Tage]							Anzahl der Versuche je Tiefe	Gesamtzahl der Versuche
		7	28	90 (120) ¹⁾	400	780 ²⁾ (700) ³⁾	960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾			
Kapillare Wasseraufnahme	0 - 10	2	1	1	2	2	1	2	1	12
		-	2	-	4	-	2	-	3	
	0 - 20	2	2	-	2	-	1	1	2	15
		1	5	-	2	-	1	1	8	
	0 - 50	2	2	1	2	3	2	1	2	35
		1	1	9	-	8	1	5	1	
	10 - 50	1	2	2	-	-	1	1	2	21
		-	1	6	-	-	1	5	1	
	20 - 50 und Wandmitte	1	-	2	1	1	2	1	1	18
		1	-	4	-	4	1	5	1	
Porositätsbestimmung mittels Vakuum-sättigung	0 - 50	-	-	-	-	-	-	-	-	10
		-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mitte	-	-	-	-	-	-	-	-	26
		-	-	-	-	-	-	-	-	
Gesamtzahl der Versuche	Kap.	26	18	17	28	4	8		101	137
	Vak.	-	-	-	-	8	28		36	

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	RF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B20: Anzahl der Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme und Porositätsbestimmung an Proben der nicht nachbehandelten Wandhälften (getrennt nach Entnahmetiefe und Alter; alle Proben wurden im Vakuum getrocknet) der Wände A - D.

Versuchsart	Untersuchte Wandtiefe [mm]	Anzahl der Versuche zum angegebenen Betonalter [Tage]							Anzahl der Versuche je Tiefe	Gesamtzahl der Versuche
		7	28	90 (120) ¹⁾	400	780 ²⁾ (700) ³⁾	960 ¹⁾ 1010 ⁴⁾			
Kapillare Wasseraufnahme	0 - 10	1	1	1	1	1	1	1	1	10
		1	1	4	-	2	-	1	-	
	0 - 20	2	-	-	-	-	-	1	1	11
		1	-	3	-	-	-	1	1	
	0 - 50	2	2	1	2	4	2	1	4	38
		1	1	9	-	11	1	5	1	
	10 - 50	2	2	2	-	-	1	1	2	24
		1	1	8	-	-	1	1	5	
	20 - 50 und Wandmitte	2	-	2	1	1	1	1	1	17
		1	-	5	-	3	1	5	1	
Porositätsbestimmung mittels Vakuum-sättigung	0 - 50	-	-	-	-	-	-	-	-	10
		-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mitte	-	-	-	-	-	-	-	-	26
		-	-	-	-	-	-	-	-	
Gesamtzahl der Versuche	Kap.	29	17	17	25	4	8		100	136
	Vak.	-	-	-	-	8	28		36	

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	RF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkungen: 1) nur Wandpaar A
2) nur Wand BF
3) nur Wand D
4) nur Wandpaar B

Tab. B21: Anzahl der Versuche zum Absorptionsverhalten (ISAT, Wassereindringprüfung) und zur Messung der Karbonatisierungstiefe (getrennt nach Wandseite und Alter) der Wände A - D.

Versuchs- art	Wand- seite ¹⁾	Nachbe- handlung		Anzahl der Versuche zum angegebenen Betonalter [Tage]																Gesamt- zahl der Versuche						
		ja	nein	200 ²⁾		400-500 2)		750		1000		1100		1350												
ISAT	Norden	x		-	-	-	3	3	3	-	-	-	-	3	1	3	-	-	-	-	3	4	4	-	-	150
				-	-	3	6	7	22	-	-	3	6	6	19	-	-	6	3	4	25					
			x	-	-	-	3	3	3	-	-	-	-	3	1	3	-	-	-	-	3	4	2	-	-	
				-	-	3	8	7	24	-	-	3	6	6	19	-	-	6	3	5	23					
	Süden	x		-	-	-	x	x	3	-	-	-	-	x	-	3	-	-	-	-	3	6	4	-	-	
				-	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x					
			x	-	-	-	x	x	3	-	-	-	-	x	-	3	-	-	-	-	3	5	4	-	-	
				-	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x					
Wasser- eindring- prüfung	Norden	x		-	-	-	-	3	3	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	3	3	-	-	94
				-	-	-	4	5	16	-	-	6	-	-	-	-	-	-	7	6	25					
			x	-	-	-	-	3	3	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	3	3	-	-		
				-	-	-	5	4	16	-	-	6	-	-	-	-	-	-	7	6	25					
	Süden	x		-	-	-	-	3	3	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	3	3	-	-		
				-	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x					
			x	-	-	-	-	3	3	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	3	3	-	-		
				-	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x				
Karbo- nati- sierungs- tiefen- messung	Norden	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
			x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Süden			-	-	-	-	1	1	1	2	-	1	-	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-		
				-	-	-	-	1	6	-	-	4	3	3	12	-	-	-	-	-	-					
				-	-	-	-	1	1	2	-	1	-	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-			
				-	-	-	1	1	6	-	-	4	3	3	12	-	-	-	-	-	-					

- 1) Für die im Klimaraum gelagerten Wände ist diese Unterscheidung belanglos, die Eintragung erfolgt vereinbarungsgemäß in der Zeile für die Ausrichtung Norden.
- 2) Zu den Untersuchungen dieser Betonalter wurden die im Freien aufgestellten Wände mindestens 1 Woche vor Prüfbeginn der Absorptionsmessungen im Versuchskeller gelagert.

Legende: Die Angaben innerhalb eines Tabellenelementes betreffen folgende Wände:

AF	BF	C	D
AL	BL	Summe	

Anmerkung: In dem Fall, wo nur in der Zeile für die Nordseite eine Eintragung vorliegt und in der Zeile Südseite ein x steht, verteilen sich die Messungen dennoch auf beide Wandseiten, ohne daß dies im folgenden näher berücksichtigt wird.

Tab. B22: Zeitplan der Laborversuche (Versuchsart, Probenanzahl je Tiefe, Prüfumfang) der Wände I - VIII (Die Angaben gelten für jede der 8 Wände).

	Alter [Tage]	Untersuchte Wandtiefe [cm]	Anzahl der Versuche zu den Prüfungen			Summe der Prüf- anzahl
			Diffusion	Kapillar- leitung	Vacuum- sättigung	
Pro Wand	28	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	1	1	1	3
		1,5	1	1	1	3
		2,0	2	1	1	4
		2,5	2	1	1	4
		3,0	2	1	1	4
		Σ	9	6	6	21
		Wandmitte	8	3	3	14
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 28 Tage	20	12	12	44
	90	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	-	-	-	-
		1,5	1	1	1	3
		2,0	-	-	-	-
		2,5	2	1	1	4
		3,0	-	-	-	-
		Σ	4	3	3	10
		Wandmitte	7	3	3	13
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 90 Tage	14	9	9	32
	180	c = 0,5	-	-	-	-
		1,0	1	1	1	3
		1,5	-	-	-	-
		2,0	2	1	1	4
		2,5	-	-	-	-
		3,0	2	1	1	4
		Σ	5	3	3	11
		Wandmitte	6	3	3	12
		unb. Rand	2	3	3	8
		Σ 180 Tage	13	9	9	31
	360	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	1	1	1	3
		1,5	1	1	1	3
		2,0	2	1	1	4
		2,5	2	1	1	4
		3,0	2	1	1	4
		Σ	9	6	6	21
		Wandmitte	8	3	3	14
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 360 Tage	20	12	12	44
	alle Alter	alle Tiefen	67	42	42	151
alle Wände	Gesamtsumme		536	336	336	1208

Tab. B23: Zeitplan der Bauteilversuche zum Absorptionsverhalten (getrennt nach untersuchter Wand, Wandseite, geprüfter Betondeckungsdicke und Alter) der Wände I - VIII.

Alter [Tage]	Wand- bezeich- nung	Anzahl der ISA-Messungen für die Beton- deckung c = [cm]							Anzahl der Wassereindringprüfungen für die Betondeckung c = [cm]						
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	u.R.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	u.R.
28 - 56	I b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	II b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	III b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	V b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	-	1	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57 - 120	I b	2	2	2	2	2	2	4	-	-	-	-	-	-	-
	II b	1	2	1	2	1	2	3	-	-	-	-	-	-	-
	III b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	V b	-	1	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121 - 180	I b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	2	1	2	1	2	1	3	-	2	-	2	-	2	2
	VIII b	3	1	3	1	3	1	4	-	2	-	2	-	2	2
181 - 240	I b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	V b	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
	VI b	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
	VII b	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2
	VIII b	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2
241 - 400	I b	2	1	2	1	2	1	3	2	1	2	1	2	1	3
	II b	2	-	2	-	2	-	2	2	2	2	2	2	2	4
	III b	1	2	1	2	1	2	3	2	1	2	1	2	1	3
	IV b	2	2	2	2	2	2	4	2	-	2	-	2	-	2
	V b	3	2	3	2	3	2	5	2	-	2	-	2	-	2
	VI b	-	1	-	1	-	1	1	1	2	1	2	1	2	3
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28 - 400	I b	5	4	5	4	5	4	9	2	1	2	1	2	1	3
	II b	4	3	4	3	4	3	7	2	2	2	2	2	2	4
	III b	3	4	3	4	3	4	7	2	1	2	1	2	1	3
	IV b	5	3	5	3	5	3	8	2	-	2	-	2	-	2
	V b	5	4	5	4	5	4	9	2	1	2	1	2	1	3
	VI b	2	2	2	2	2	2	4	1	3	1	3	1	3	4
	VII b	3	2	3	2	3	2	5	1	3	1	3	1	3	4
	VIII b	4	2	4	2	4	2	6	1	3	1	3	1	3	4
Σ je Betondeckung		31	24	31	24	31	24	55	13	14	13	14	13	14	27
Gesamtsumme		-	-	-	-	-	-	220	-	-	-	-	-	-	108

Tab. B24: Lage der den Versuchshäusern 1 - 4 in Beckum entnommenen Bohrkern

Bohrkern-bez.	Bohrkern-durch-messer [mm]	Lage des Bohrkerns (obere Zeile: Höhe über Erdboden in cm) (untere Zeile: Entfernung von der in der je- weiligen Wandansicht linken Wandkante in cm)			
		Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
W 1	150	183	140	133	141
		28	51	39	34
W 2	150	98	102	94	108
		62	89	89	71
W 3	150	99	100	98	101
		141	142	140	133
W 4	150	134	139	139	138
		173	161	168	174
W 5	50	126	142	128	137
		66	90	94	75
W 6	50	126	140	128	135
		136	115	123	131
O 1	150	59	65	73	55
		36	37	35	29
O 2	150	60	69	66	48
		165	168	169	165
O 3	50	141	149	147	132
		39	32	32	37
O 4	50	140	138	148	131
		163	168	162	165

Anmerkung: W i: Bohrkern der Nr. i aus der Westwand
O i: Bohrkern der Nr. i aus der Ostwand

Tab. B25: Zusammenstellung der Versuchsanzahl für die Beckumer Versuchshäuser (Laborversuche)

Untersuchte Eigenschaft bzw. Ver- suchsart	Unter- suchte Wand	Lage- rungs- bedin- gung	Tiefe [mm]	Anzahl der Versuche zum Betonalter von ca. 25 Jahren für				Gesamt- zahl der Versuche
				HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	
Quecksilber- druckporosi- metrie	West- wand	innen	0- 10	2	2	2	2	76
			10- 20	2	2	2	2	
			20- 30	2	2	2	2	
			30- 40	2	2	-	-	
			40- 50	2	2	-	-	
			Mitte	2	2	2	2	
			100-110	2	2	2	2	
			110-120	2	2	-	-	
			120-130	2	2	2	2	
			130-140	2	2	2	2	
			140-150	2	2	2	2	
		außen						
Porosität mittels Va- kuumsättigung	West- wand	innen	0- 50	2	2	2	2	24
		mitte	50-100	2	2	2	2	
		außen	100-150	2	2	2	2	
CO ₂ - Diffu- sionskoeffi- zient	West- wand	innen	0- 10	1	1	-	1	42
			10- 20	1	1	1	1	
			20- 30	1	1	1	1	
			30- 40	1	1	1	1	
			40- 50	1	-	1	1	
			Mitte	1	1	1	1	
			100-110	1	1	1	1	
			110-120	1	1	1	1	
			120-130	1	1	1	1	
			130-140	1	1	1	1	
			140-150	1	1	1	1	
		außen						
Kapillare Wasserauf- nahme	West- wand	innen	0- 50	2	2	2	2	24
		mitte	50-100	2	2	2	2	
		außen	100-150	2	2	2	2	
	West- wand ohne Kar- bonat- Rand	innen	je nach Karbo- nati- sie- rungs- tiefe	2	2	2	2	16
		mitte						
		außen						
	Ost- wand	innen	0- 50	2	2	2	2	24
		mitte	50-100	2	2	2	2	
		außen	100-150	2	2	2	2	
Gesamtzahl der Versuche pro Haus				55	54	48	49	206

Tab. B26: Zusammenstellung der Versuchsanzahl für die Beckumer Versuchshäuser (Bauteilversuche, Messung der Karbonatisierungstiefe).

Untersuchte Eigenschaft bzw. Versuchsart	Untersuchte Wand	Lagerungsbedingung	Anzahl der Versuche zum Betonalter von ca. 25 Jahren für				Gesamtzahl der Versuche
			HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	
ISAT	Westwand	innen	4	-	-	-	44
		außen	4	2	4	4	
	Westwand, Bohrkern Ø 150	innen	1	1	1	1	
		außen	1	1	1	1	
	Ostwand ¹⁾	innen	-	-	-	-	
		außen	-	2	-	-	
	Ostwand, Bohrkern Ø 150	innen	2	2	2	2	
		außen	2	2	2	2	
Wassereindringprüfung (Meßstellen ca. 20 cm links der ISA-Meßstellen)	Westwand	innen	-	-	-	-	16
		außen	4	-	2	2	
	Westwand, Bohrkern Ø 150	innen	1	1	1	1	
		außen	1	1	1	1	
	Ostwand	innen	-	-	-	-	
		außen	-	-	-	-	
	Ostwand, Bohrkern Ø 150	innen	-	-	-	-	
		außen	-	-	-	-	
Karbonatisierungstiefe	Westwand, Bohrkern Ø 150 ²⁾	innen	2	2	2	2	32
		außen	2	2	2	2	
	Ostwand, Bohrkern Ø 50 ³⁾	innen	2	2	2	2	
		außen	2	2	2	2	
Gesamtzahl pro Haus			28	20	22	22	92

1) Lage der Meßstellen entsprechend Meßstelle 1 und 3 der Westwand (siehe Bild B6)

2) je Bohrkern 8 Meßstellen pro Spaltfläche

3) je Bohrkern 5 Meßstellen pro Spaltfläche

Tab. B27: Zusammenstellung der Versuchsanzahl getrennt nach den untersuchten Eigenschaften für die Objekte Institutswand und Kühlhauswand

Untersuchte Eigenschaft bzw. Versuchsart	Untersuchte Wand	Institutswand			Untersuchte Wand	Kühlhauswand		
		Lagerungsbedingung	Tiefe [mm]	Versuchsanzahl		Lagerungsbedingung	Tiefe [mm]	Versuchsanzahl
Quecksilberdruckporosimetrie	Nordwand	Außen Wandinnere	0 - 10 > 85	2 2	Mittelwand	Wandinnere	75-85	2
Porosität mit Vakuumsättigung	-	-	-	-	Mittelwand Außenwand	außen mitte außen mitte innen	0- 50 50-100 100-150 0- 50 50-100 100-150	1 1 1 2 2 2
CO ₂ -Diffusionskoeffizient	Nordwand	Außen	0 - 10 10 - 20	2 2	Mittelwand	außen mitte außen innen	0- 10 10- 20 35- 45 65- 75 75- 85 105-115 130-140 140-150 0- 10 10- 20 35- 45 65- 75 75- 85 105-115 130-140 140-150	1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2
Kapillare Wasseraufnahme	Nordwand	Außen Wandinnere	0 - 40 0 - 50 25 - 75 85 - 135	2 2 2 2	Mittelwand Außenwand	außen mitte innen außen mitte innen	0- 50 50-100 100-150 0- 50 50-100 100-150	1 1 1 2 2 2
ISAT	Nordwand	-	-	3	-	-	-	-
Karbonatisierungstiefe	Nordwand	-	-	2	Mittel- und Außenwand	-	-	17
Gesamtzahl der Versuche	-	-	-	21	-	-	-	61

Tab. B28: Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruckporosimetrie getrennt nach Versuchskörper und untersuchter Schichttiefe für die Versuche zur künstlichen, zeitgerafften Bewitterung von Beton bei einer zyklischen Beanspruchung von wechselweise 20 Minuten Trocknung mit 80°C heißer Luft und 10 Minuten Beregnung mit entionisiertem Wasser (Prüfserie 1)

Kleinkörper zugehörig zu Wand	Tiefe [mm]	Anzahl der Versuche mittels Quecksilberdruckporosimetrie zur angegebenen Zyklenzahl						Gesamtzahl der Versuche
		0	1000	3000	4000	5000	8000	
A	0-10	3	2	-	-	2	3	38
	10-20	2	2	-	-	2	2	
	20-30	3	-	-	-	-	2	
	30-40	3	-	-	-	-	2	
	40-50	3	3	-	-	2	2	
	Summe	14	7	0	0	6	11	
B	0-10	1	3	2	3	-	3	46
	10-20	1	-	2	2	-	3	
	20-30	-	-	2	3	-	3	
	30-40	-	-	-	3	-	3	
	40-50	1	3	2	3	-	3	
	Summe	3	6	8	14	0	15	
C	0-10	2	2	3	-	-	3	43
	10-20	2	2	3	-	-	3	
	20-30	2	-	3	-	-	1	
	30-40	2	-	3	-	-	2	
	40-50	2	2	3	-	-	3	
	Summe	10	6	15	0	0	12	
Gesamtzahl der Versuche		27	19	23	14	6	38	127

Tab. B29: Anzahl der Versuche getrennt nach Versuchskörper und Versuchsart für die Versuche zur künstlichen zeitgerafften Bewitterung von Beton bei einer zyklischen Beanspruchung von wechselweise 21 Minuten Trocknung mit 80°C heißer Luft und 3 Minuten Beregnung mit entionisiertem Wasser (Prüfserie 2)

Kleinkörper zugehörig zu Wand	Tiefe [mm]	Untersuchte Eigenschaft	Anzahl der Versuche pro Versuchsart zur angegebenen Zyklenzahl					Gesamtzahl der Versuche
			0	1000	5000	7000	8000	
A B C	0-50	Porosität mittels Wassersättigung	3 2 3	1 1 2	- 2 2	- 2 2	2 - -	22
A B C	0-50	Kapillares Saugverhalten	3 1 2	1 1 2	- 1 1	- 2 2	2 - -	18
A B C	-	Karbonatisierungstiefe	1 2 2	- 1 1	- 2 2	- - -	1 - -	12
Gesamtzahl der Versuche	-	-	19	10	10	8	5	52

Tab. B30: Versuchsumfang der den Wänden I - VIII entnommenen Proben zur Ermittlung der Materialstreuung (getrennt nach Alter und Versuchsart).

Versuchsart	Untersuchte Probenanzahl zum Betonalter [Tage] (Anzahl pro Wand)					Entnahmeort
	28	90	180	360	28-360	
Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme	6	3	3	6	18	Betondeckungen unterschiedlicher Dicke
CO ₂ -Diffusionsversuche ¹⁾	6		9		15	Proben aus dem Bereich der Betondeckungen (Probendicke: 6-11 mm)
	9		9		18	Proben aus dem mittleren Wandbereich (Probendicke: 6-11 mm)
Porositätsbestimmungen mittels Wassersättigung	6	3	3	6	18	Betondeckungen unterschiedlicher Dicke
ISA-Versuche ²⁾	-	9-18			20-26	Betonoberflächen der bewehrten Wandseiten

1) Angegeben sind die Mittelwerte der Versuchsanzahl pro Wand.

2) Die Anzahl der Meßstellen auf einer Wandoberfläche schwankt für die einzelnen Wände zwischen den angegebenen Zahlenwerten.

Tab. B31: Ergebnisse der Überprüfung der Gleichmäßigkeit der sechs eingesetzten Wägezellen und der zeitlichen Konstanz der Meßsignale.

Parameter		Angezeigtes Gewicht der Wägezelle j [digits]					
		1	2	3	4	5	6
Probengewicht [g]		57,60	58,80	57,60	180,50	137,55	87,54
Anzeige der Wägezelle [digits]		435	444	436	1360	1037	662
Differenz [g]		57,64	58,83	57,77	180,20	137,40	87,72
		+0,04	+0,03	+0,17	-0,30	-0,15	+0,18
NR.	Uhrzeit						
1	11.31	433	444	435	1359	1035	661
2	13.24	436	447	439	1363	1039	662
3	15.24	437	449	441	1366	1041	662
4	18.23	434	446	439	1364	1039	661
5	20.23	434	447	439	1363	1038	660
6	22.23	435	447	439	1362	1038	660
7	0.23	436	447	439	1362	1038	659
8	2.23	436	447	439	1362	1038	659
9	4.23	437	447	440	1363	1039	659
10	6.23	438	448	440	1363	1038	658
11	8.23	438	448	440	1362	1039	657
12	10.23	438	446	439	1362	1038	660
13	12.23	437	445	439	1359	1037	660
14	14.23	435	443	438	1358	1036	661
15	16.23	435	442	437	1358	1035	663
16	18.23	433	440	434	1356	1033	664
17	20.23	434	441	435	1357	1033	663
18	22.23	435	441	435	1358	1034	663
19	0.21	435	442	435	1358	1035	663
20	2.21	435	442	435	1357	1035	663
21	4.21	435	442	436	1359	1036	663
22	6.21	435	442	435	1358	1036	664
23	10.21	436	441	434	1357	1035	666
24	14.21	433	439	434	1356	1034	669
25	18.21	432	439	433	1358	1034	671
26	22.20	435	441	435	1360	1037	668
27	2.17	436	442	435	1361	1037	661

Tab. B32: Statistische Analyse der Ergebnisse von Tab. B31

Statistischer Parameter	Ergebnisse der statistischen Analyse für die Wagezelle j					
	1	2	3	4	5	6
Anzahl der Werte	27	27	27	27	27	27
Summe der Werte	11753	11958	11799	36721	27987	17880
Mittelwert	435,30	443,89	437,00	1360,0	1036,6	662,22
Median	435	443	437	1359	1037	662
Varianz	2,524	9,487	5,846	7,499	4,410	10,872
Standardabweichung	1,589	3,080	2,418	2,738	2,100	3,297
Maximalwert	438	449	441	1366	1041	671
Minimalwert	432	439	433	1356	1033	657
Max. - Min.	6	10	8	10	8	14
Variationskoeffizient [%]	0,37	0,69	0,55	0,20	0,20	0,50
Differenz Mittelwert zu Anfangswert	+0,30	-0,11	+1,00	+0,04	-0,44	+0,22
Sind die Meßwerte normalverteilt?	ja	nein	nein	nein	ja	nein

Tab. B33: Überprüfung der Hypothesen über die Gleichwertigkeit und Zeitkonstanz der sechs Wagezellen nach einem in [B24] angegebenen und dort erläuterten Verfahren (näheres siehe dort)

Nr.	Differenz angezeigtes Gewicht zu Anfangsgewicht [digits]						Quadrierte Gewichts-differenz [digits ²]						Summe der Δg [digits]	(ΣΔ) ²
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
1	-2	0	-1	-1	-2	-1	4	0	1	1	4	1	-7	49
2	+1	+3	+3	+3	+2	0	1	9	9	9	4	0	12	144
3	+2	+5	+5	+6	+4	0	4	25	25	36	16	0	22	484
4	-1	+2	+3	+4	+2	-1	1	4	9	16	4	1	9	81
5	-1	+3	+3	+3	+1	-2	1	9	9	9	1	4	7	49
6	0	+3	+3	+2	+1	-2	0	9	9	4	1	4	7	49
7	+1	+3	+3	+2	+1	-3	1	9	9	4	1	9	7	49
8	+1	+3	+3	+2	+1	-3	1	9	9	4	1	9	7	49
9	+2	+3	+4	+3	+2	-3	4	9	16	9	4	9	11	121
10	+3	+4	+4	+3	+1	-4	9	16	16	9	1	16	11	121
11	+3	+4	+4	+2	+2	-5	9	16	16	4	4	25	10	100
12	+3	+2	+3	+2	+1	-2	9	4	9	4	1	4	9	81
13	+2	+1	+3	-1	0	-2	4	1	9	1	0	4	3	9
14	0	-1	+2	-2	-1	-1	0	1	4	4	1	1	-3	9
15	0	-2	+1	-2	-2	+1	0	4	1	4	4	1	-4	16
16	-2	-4	-2	-4	-4	+2	4	16	4	16	16	4	-14	196
17	-1	-3	-1	-3	-4	+1	1	9	1	9	16	1	-11	121
18	0	-3	-1	-2	-3	+1	0	9	1	4	9	1	-8	64
19	0	-2	-1	-2	-2	+1	0	4	1	4	4	1	-6	36
20	0	-2	-1	-3	-2	+1	0	4	1	9	4	1	-7	49
21	0	-2	0	-1	-1	+1	0	4	0	1	1	1	-3	9
22	0	-2	-1	-2	-1	+2	0	4	1	4	1	4	-4	16
23	+1	-3	-2	-3	-2	+4	1	9	4	9	4	16	-5	25
24	-2	-5	-2	-4	-3	+7	4	25	4	16	9	49	-9	81
25	-3	-5	-3	-2	-3	+9	9	25	9	4	9	81	-7	49
26	0	-3	-1	0	0	+6	0	9	1	0	0	36	2	4
27	+1	-2	-1	+1	0	-1	1	4	1	1	0	1	-2	4
Σj	+8	-3	+27	+1	-12	+6							+27	2065
Σj ²							68	247	179	195	120	284	1093	
(Σj) ²	64	9	729	1	144	36							983	729

A=983; B=2065; C=D=1093; S²..=729; p=6; q=27; n=1

S(p)=31,91; S(q)=339,67; S(pq)=716,93; S=1088,5

s²_{IV}=6,382; s²_{III}=13,06; s²_{II}=5,51

s²_{IV}/s²_{II} = 1,16 < F₉₅(5,130) = 2,30

s²_{III}/s²_{II} = 2,37 < F₉₅(130,5) = 4,40

Tab. B34: Größe des Variationskoeffizienten von ISA_t - Messungen (7 bis 9 Messungen auf den Bereich mit einer 2 cm dicken Betondeckung; alle Messungen wurden an ein und denselben Tag durchgeführt).

Nr. der Messung	Wand III			Wand V		
	ISA_{10} [ml/m ² s]	ISA_{30} [ml/m ² s]	ISA_{60} [ml/m ² s]	ISA_{10} [ml/m ² s]	ISA_{30} [ml/m ² s]	ISA_{60} [ml/m ² s]
1	-	-	-	0,50	0,16	0,11
2	0,15	0,09	-	0,30	0,17	0,10
3	0,07	0,03	0,02	0,38	0,15	0,10
4	0,08	0,035	0,015	0,36	0,14	0,11
5	0,10	0,05	0,02	0,47	0,18	0,12
6	0,03	0,02	0,01	0,32	0,14	0,09
7	0,07	0,035	0,025	0,28	0,13	0,08
8	0,03	0,03	0,02	0,25	0,12	0,03
9	0,14	0,07	0,03	0,44	0,18	0,12
\overline{ISA}	0,084	0,045	0,020	0,361	0,152	0,096
s	0,0447	0,0238	0,0065	0,0819	0,0217	0,0279
Variationskoeffizient [%]	53,3	52,8	32,3	22,7	14,3	29,1
\overline{v}	46,1			22,0		

ABBILDUNGEN

TEIL B

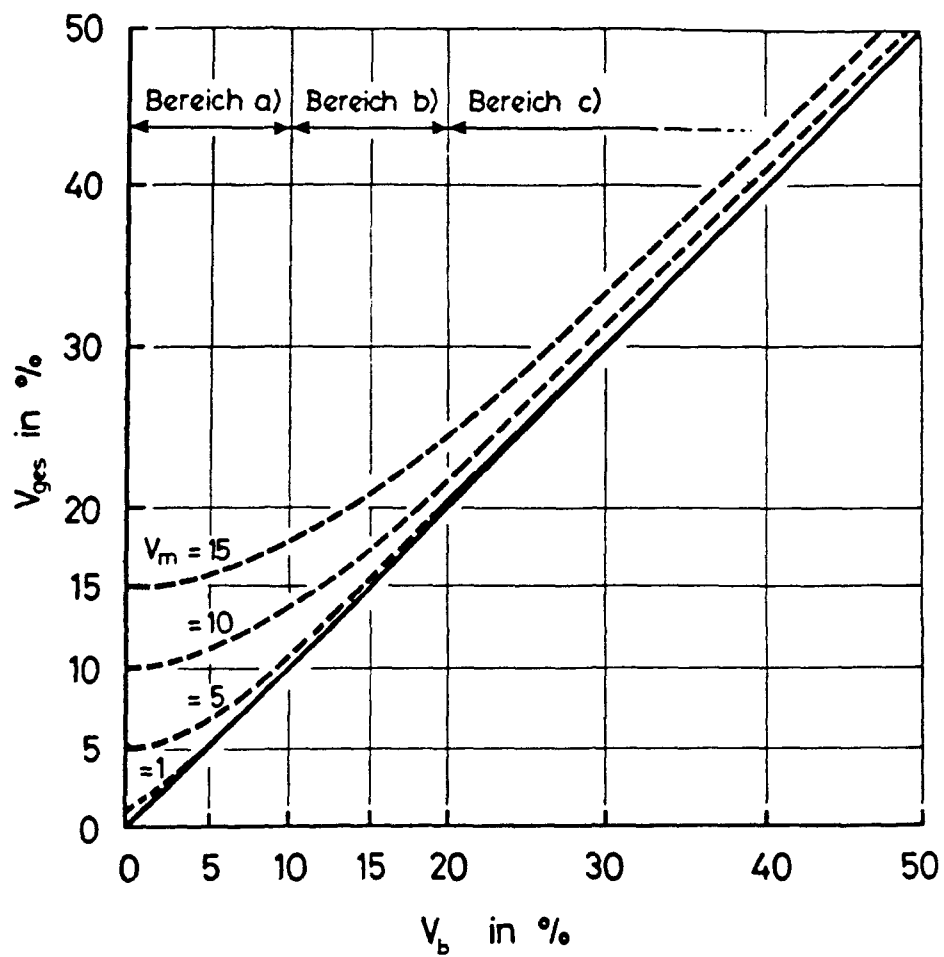
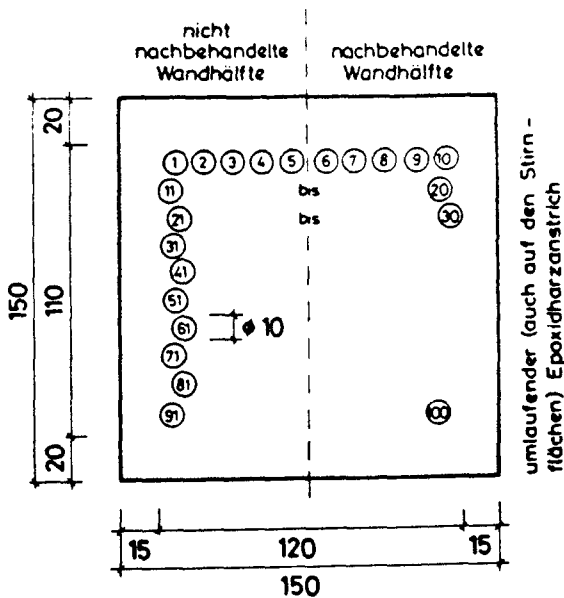
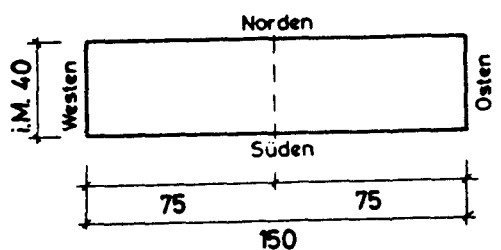


Bild B1: Abhängigkeit der Größe des Variationskoeffizienten von den Teilvariationskoeffizienten für die Meßtechnik und den Beton an sich.

Wand AF und BF



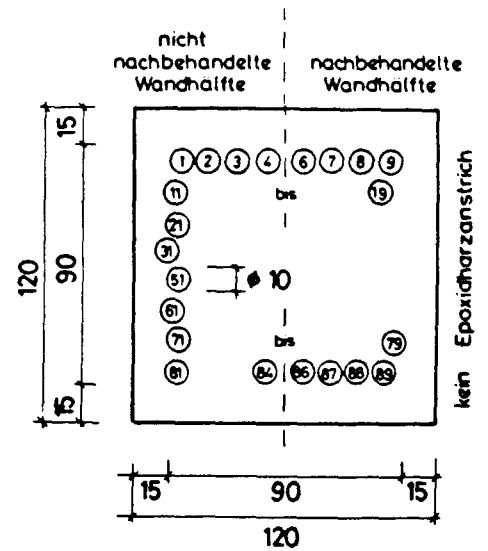
Ansicht



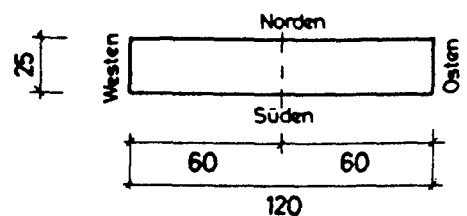
Draufsicht

alle Maße in cm

Laborwände sowie Wand C und D



Ansicht



Draufsicht

alle Maße in cm

Bild B2: Abmessungen und Bohrkernlageplan der Wände A - D (einschließlich der Kennzeichnung der unterschiedlichen Nachbehandlungsbereiche).

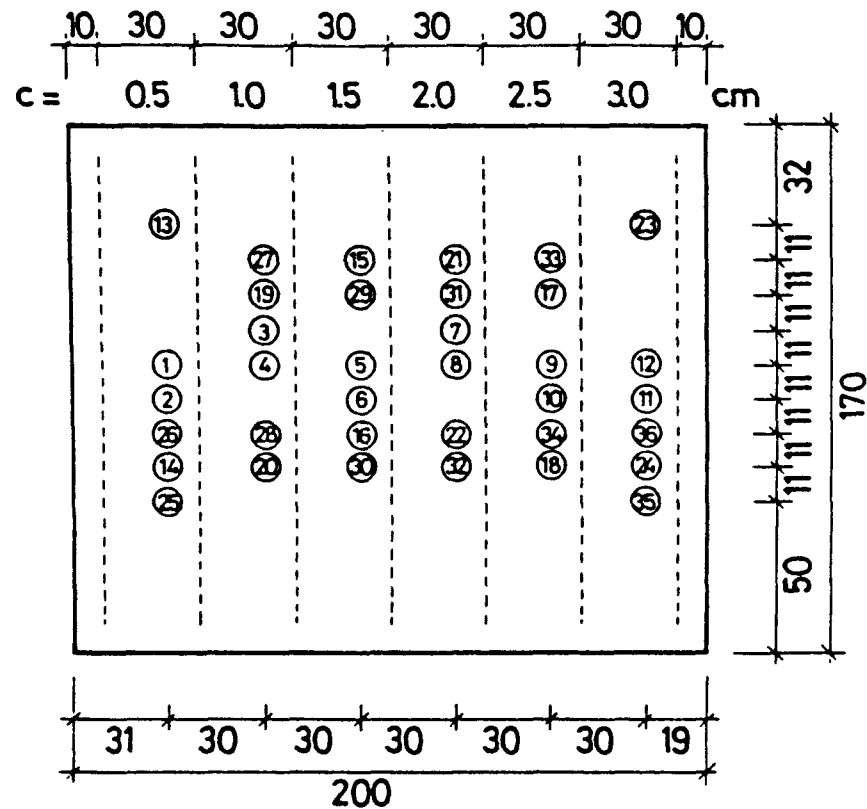
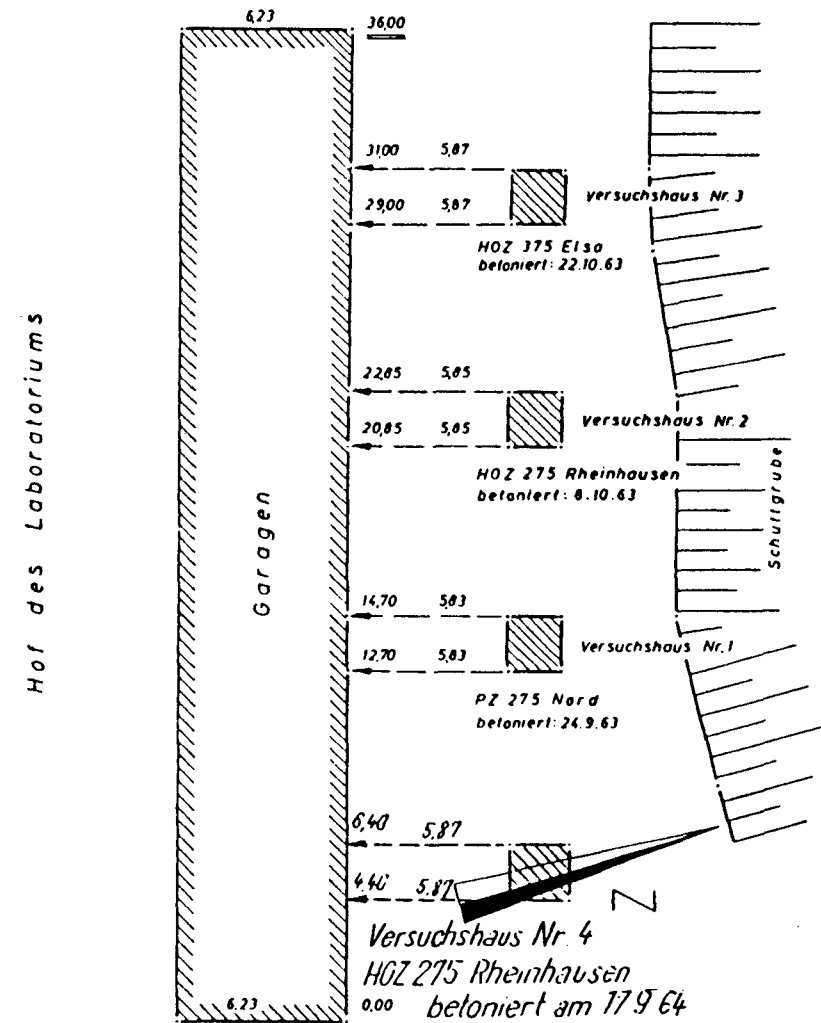


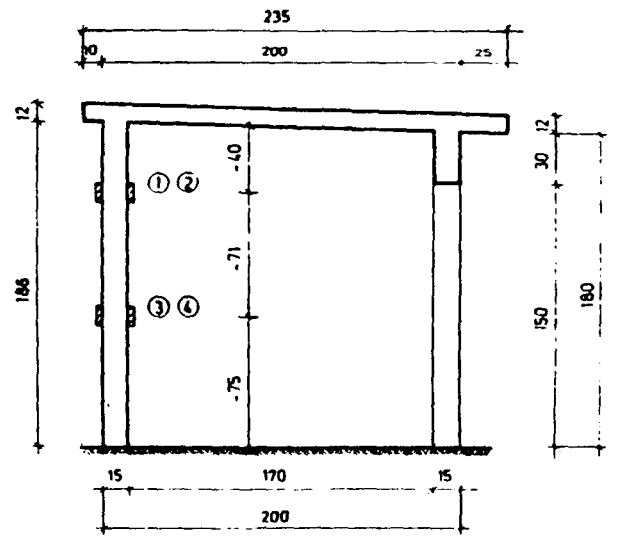
Bild B4: Lage und Numerierung der Bohrkern von Wand I - VIII.

Versuchshäuser - Lageplan

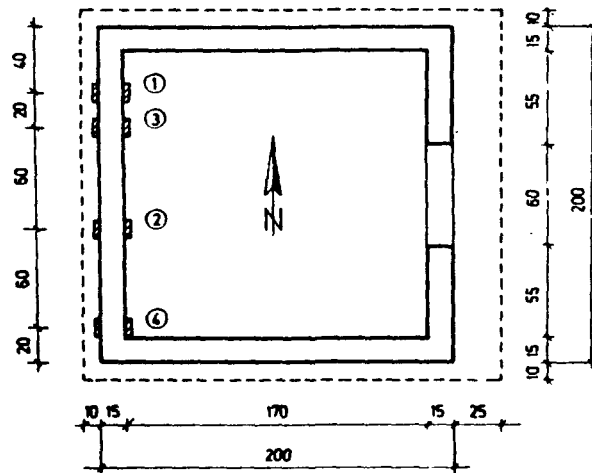


M. 1 : 200

Bild B5: Lageplan der Versuchshäuser in Beckum.



Schnitt Ost - West



Grundriss

M 1:25

alle Maße in cm

① : Nr. der ISAT-Meßstelle

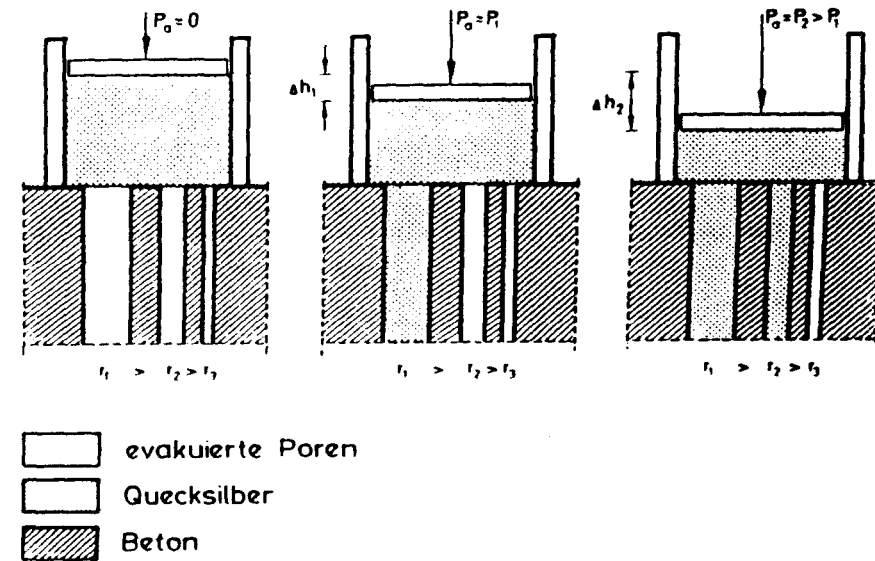
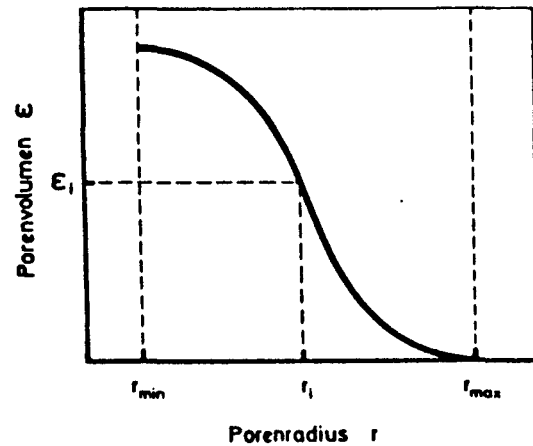


Bild B7: Schematische Darstellung des Porenmodells und des Füllvorgangs der Poren bei der Quecksilberdruckporosimetrie.

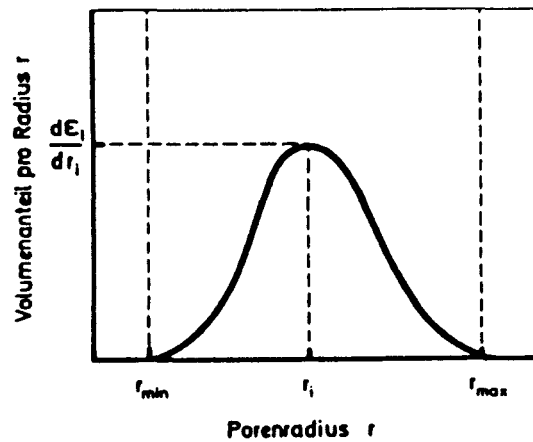
Integrale Porenradienverteilung



E_i = Porenvolumen aller Poren mit dem Radius $r_i \leq r \leq r_{\max}$

$r_{\min} \cdot r_{\max}$ = Grenzzahlen des Meßbereiches

Differentielle Porenradienverteilung



$\frac{dE_i}{dr_i}$ = Anteil des Porenvolumens, der auf den Radius r_i entfällt

Bild 88: Prinzipielle Versuchsergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie.

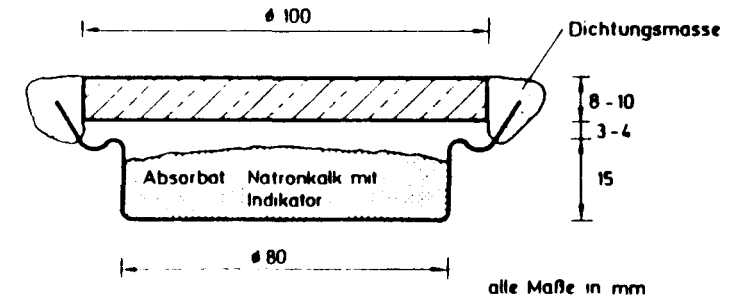
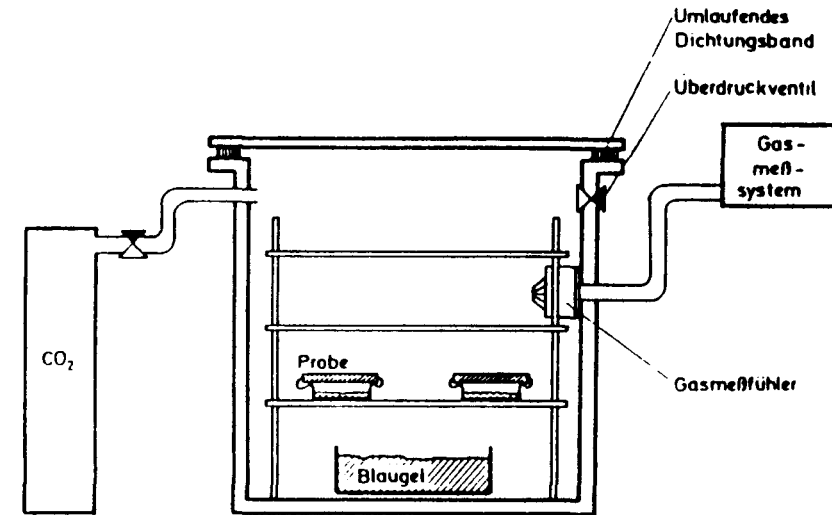


Bild 89: Versuchseinrichtung zur Bestimmung des CO_2 - Diffusionskoeffizienten.

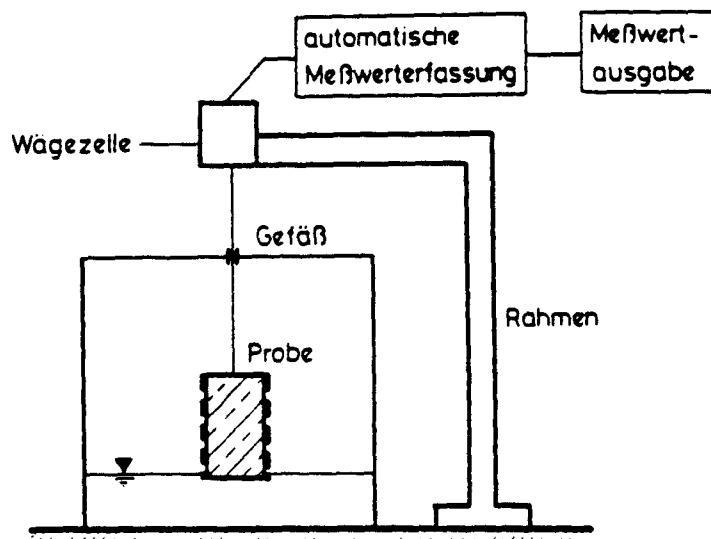
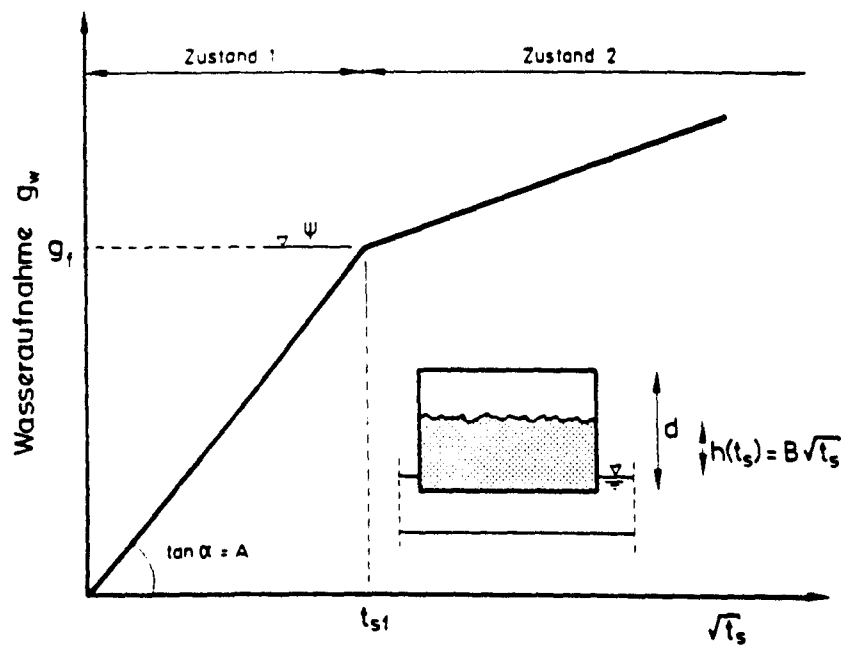


Bild B10: Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme in Laborversuchen.



A : Wasseraufnahmekoeffizient

B : Wassereindringkoeffizient

ψ : Wasserkapazität

Bild B11: Prinzipielle Versuchsauswertung der Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme.

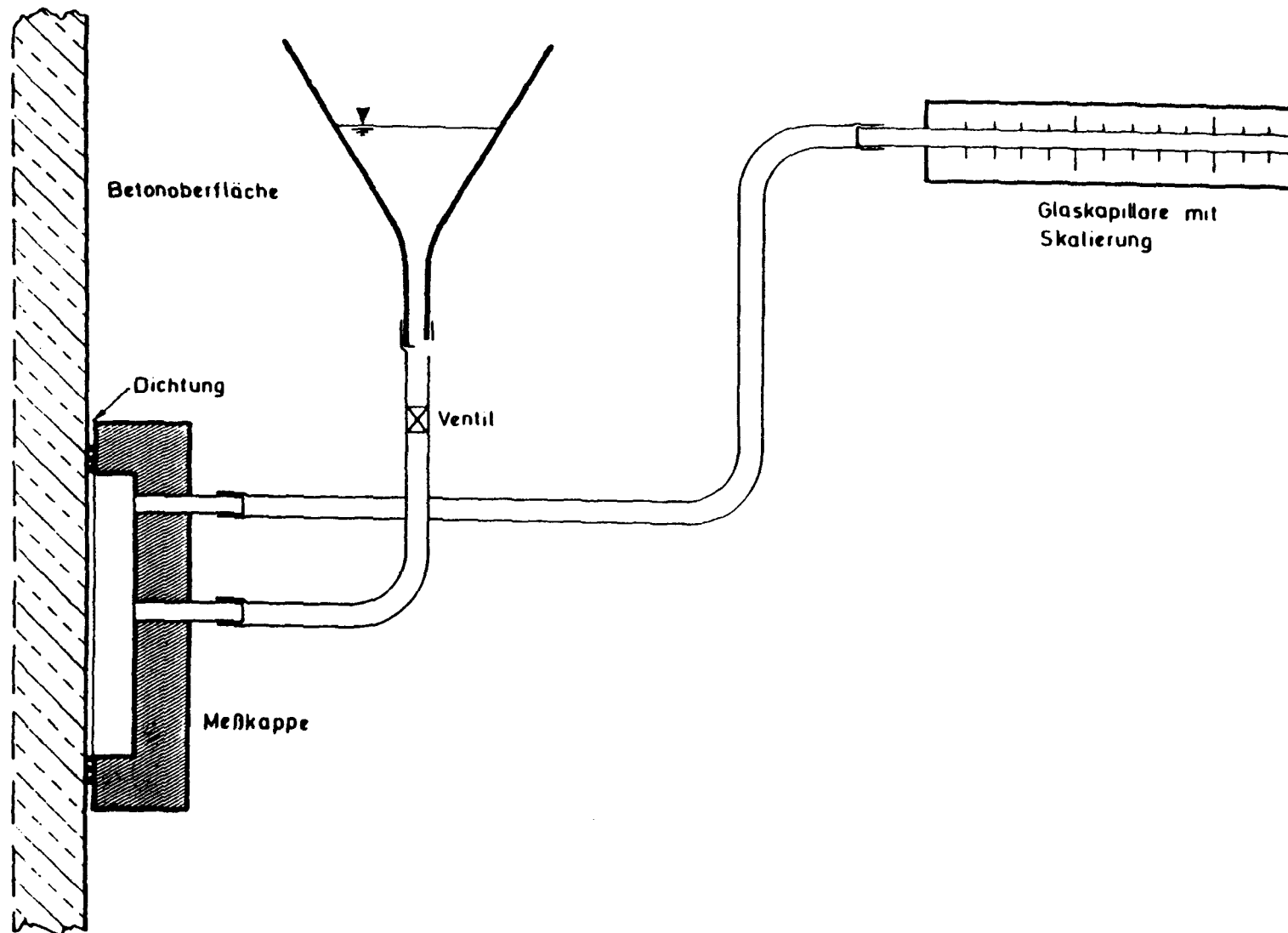


Bild B12: Versuchseinrichtung zur Bestimmung des ISA - Wertes mittels des ISA - Testverfahrens.

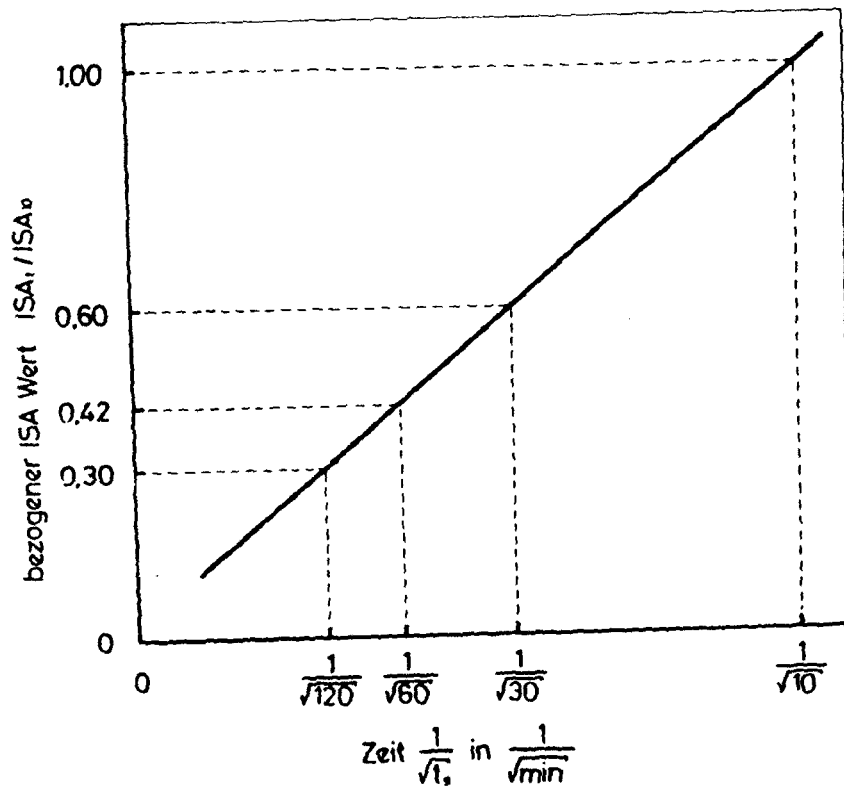


Bild B13: Abhängigkeit des ISA - Wertes von der Versuchsdauer t_s unter Berücksichtigung der im Text näher erläuterten Annahmen.

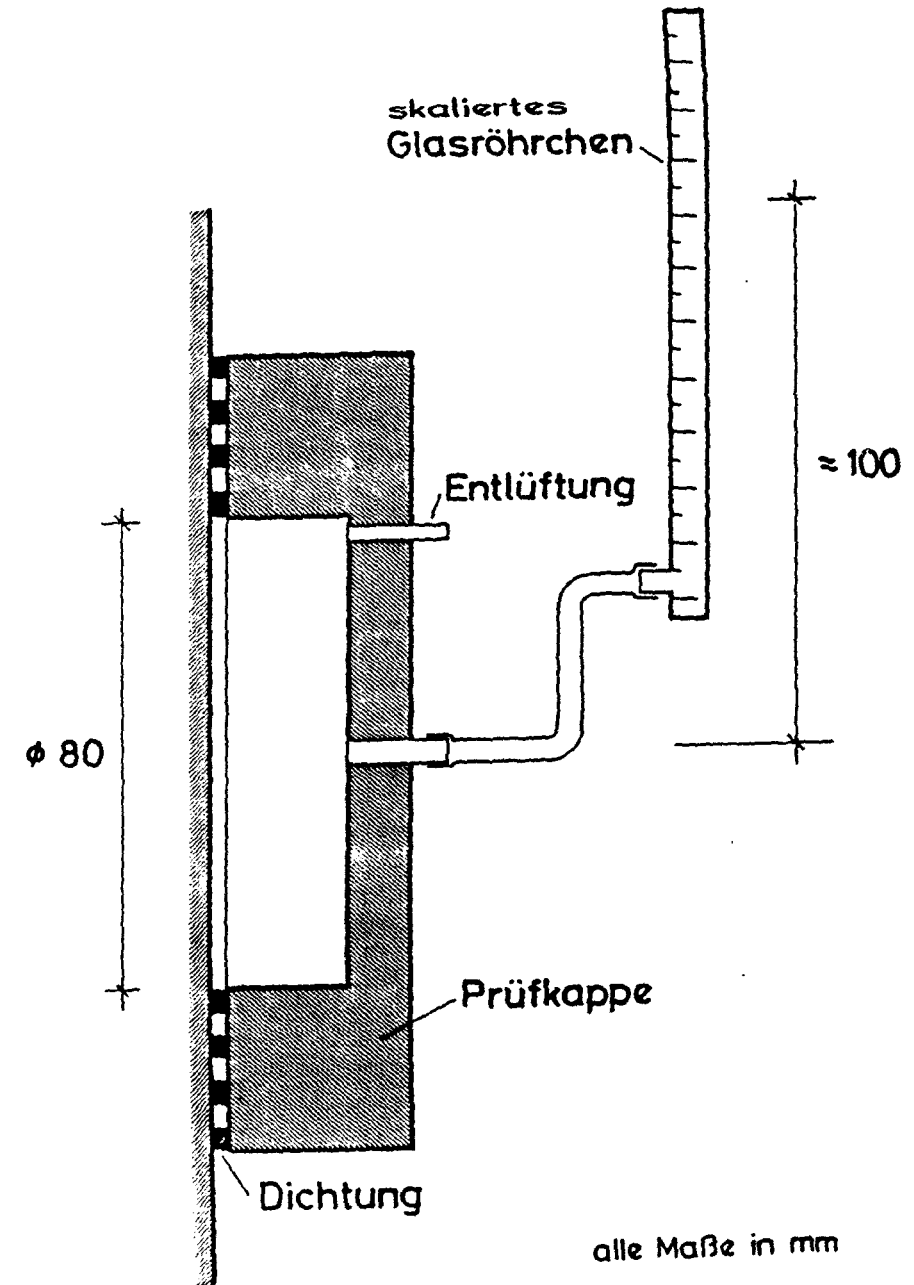
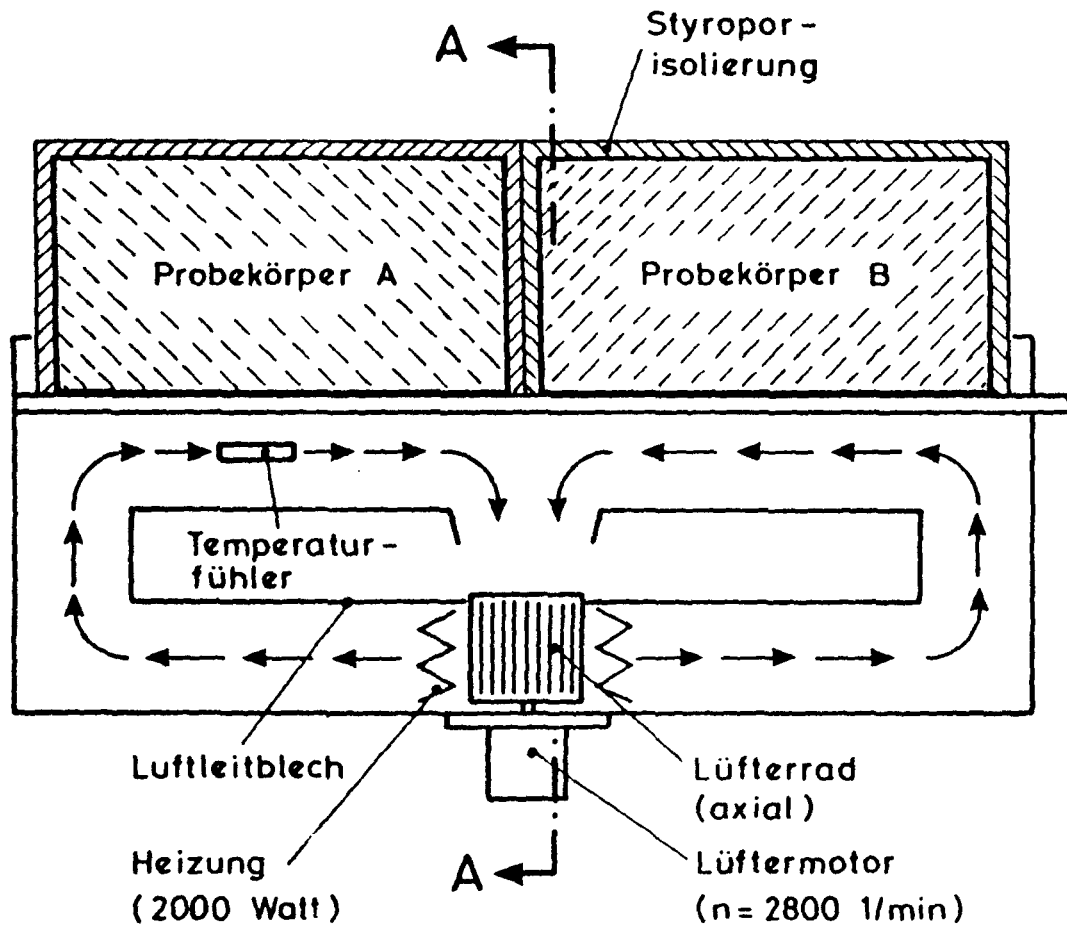


Bild B14: Skizze des Versuchsaufbaus der Wassereindringprüfung.

Horizontalschnitt



Schnitt A-A

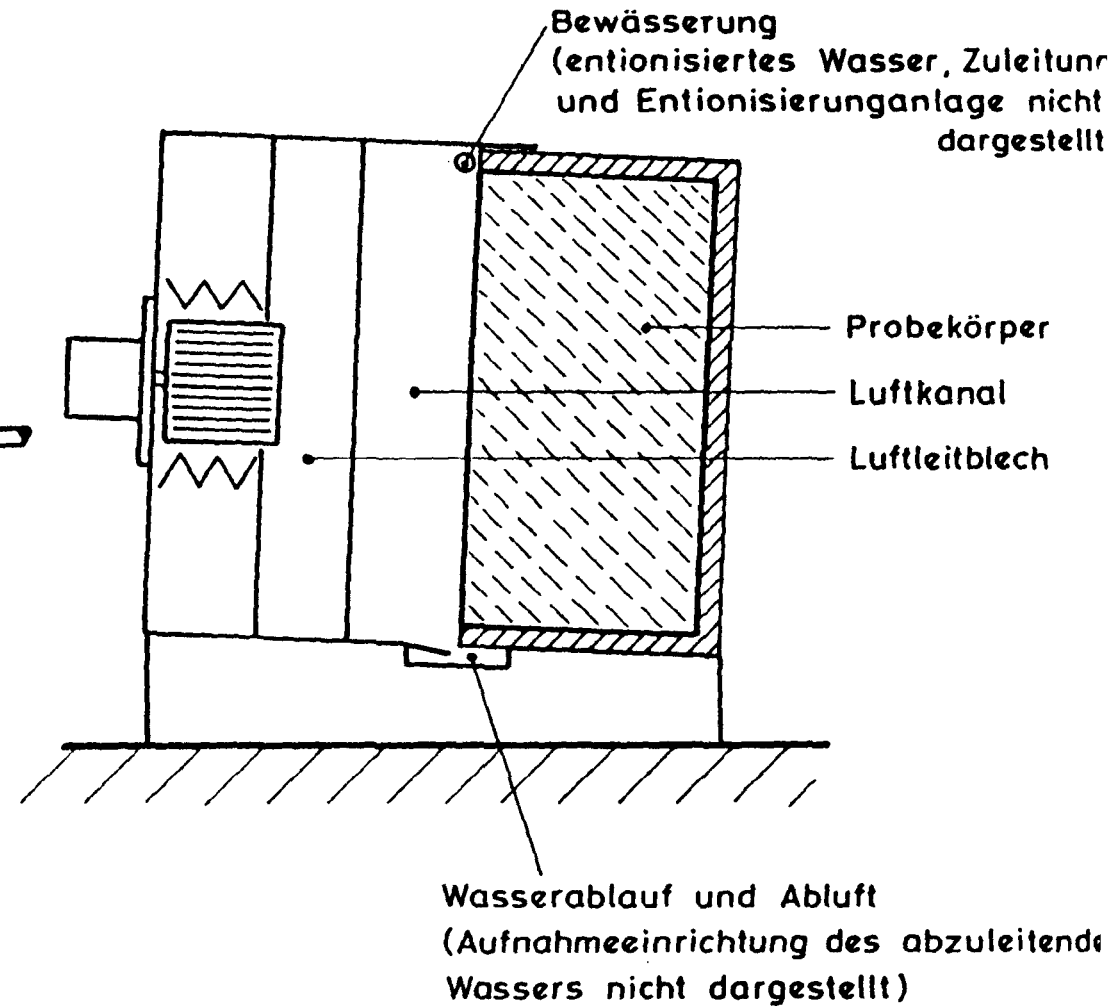
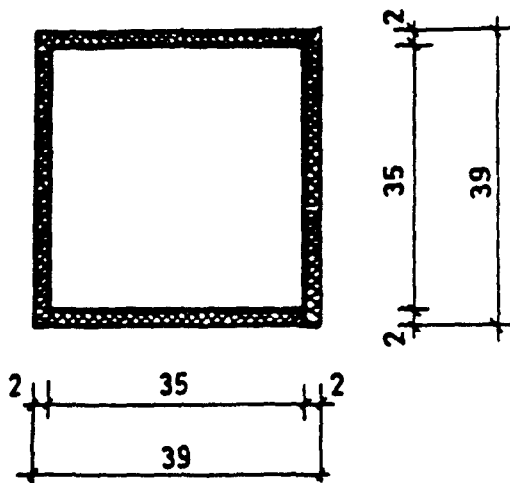


Bild B15: Skizze der Hauptelemente des Versuchsstandes zur künstlichen, zeit-
gerafften Bewitterung von Betonoberflächen.

Ansicht:

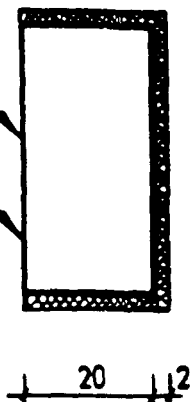


Schnitt:

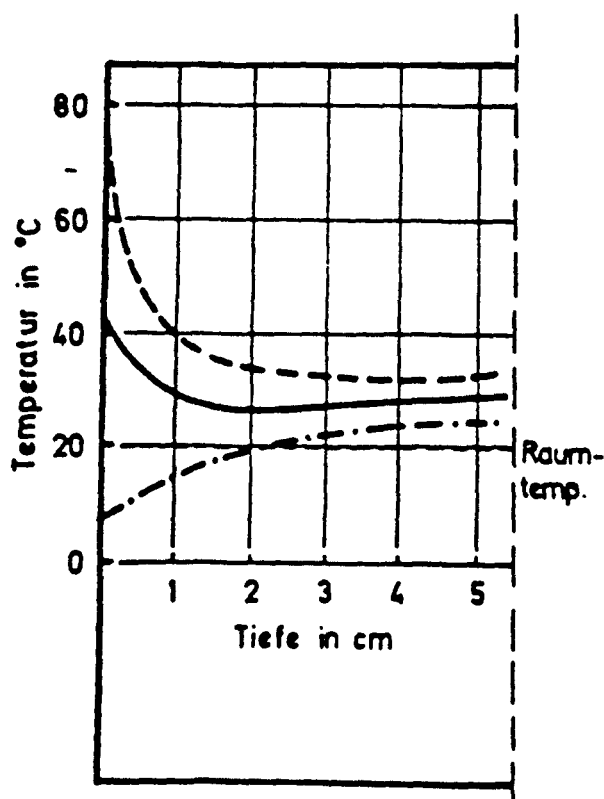
1 Beanspruchungszyklus:

10 min. Beregnung mittels entionisiertem Wasser

20 min. Trocknung mit 80°C warmer Luft

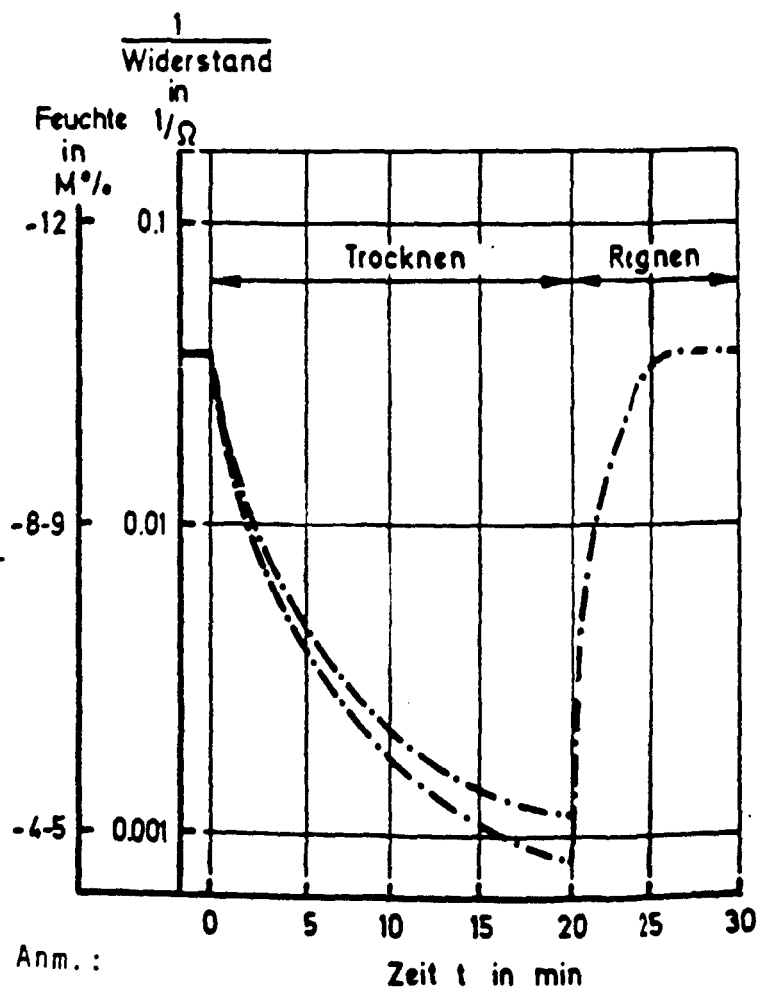


Schnitt:



Legende:

- max. Temperatur
- .-.- min. Temp.
- Mittel



Anm.:

Die Messung des Widerstandes erfolgte mit einem handelsüblichen Ohmmeter; die Zuordnung zwischen Widerstand und Feuchte wurde an einem Eichkörper gleicher Zusammensetzung ermittelt.

Bild B16: Temperatur- und Feuchteprofil im oberflächennahen Bereich des künstlich bewitterten Betons des Kleinkörpers zugehörig zu Wand B (Prüfserie 1).

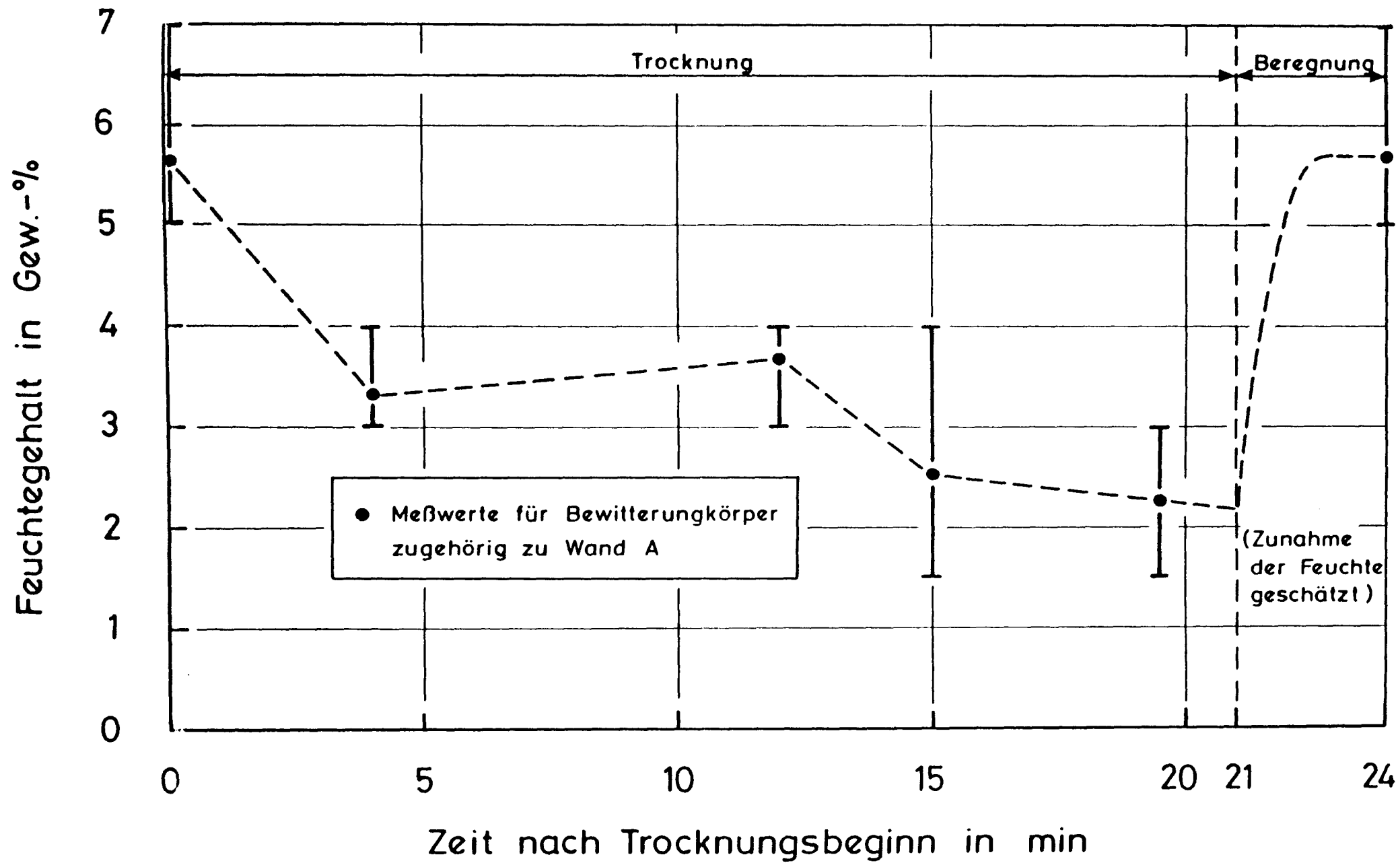
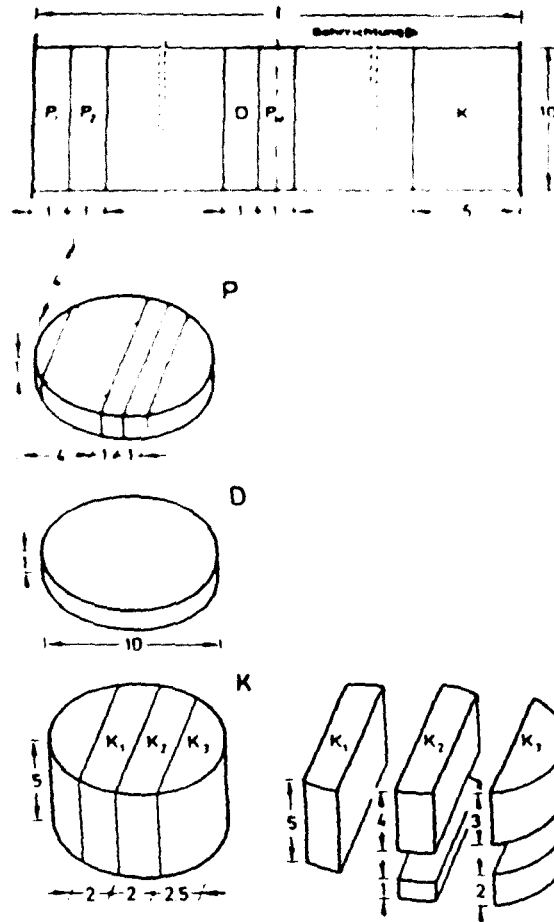


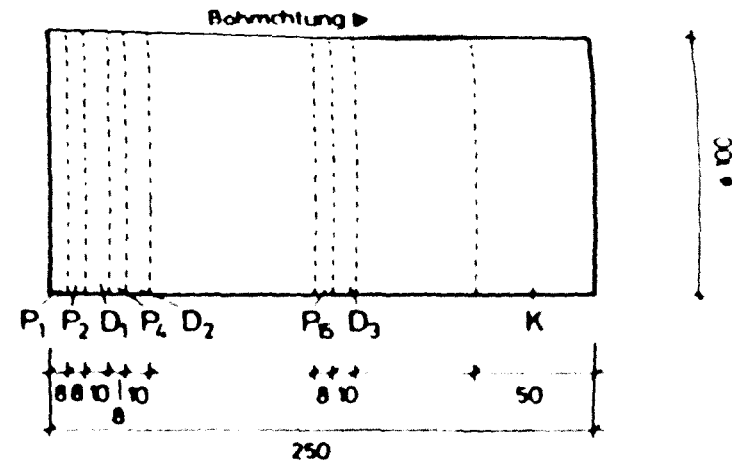
Bild B17: Feuchteprofil der oberflächennahen Zone des künstlich bewitterten Kleinkörpers zugehörig zu Wand A (Prüfserie 2).



- P : Probe für Quecksilberdruckporosimetrie
 D : Probe für CO₂-Diffusionsversuche
 K : Probe für Versuche zur kapillaren Wasserleitung

Bild B18: Darstellung der Probenabmessungen und der Lage ihrer Entnahmestellen innerhalb der Bohrkerne (Bohrkerne der Wände A - D; Betonalter $t < 400$ Tage; Wand D, $t = 400$ Tage siehe Bild B19).

Wand D 400d , Bohrkerne 23.27.71.78



Wand BF 780d , Bohrkerne 83,88

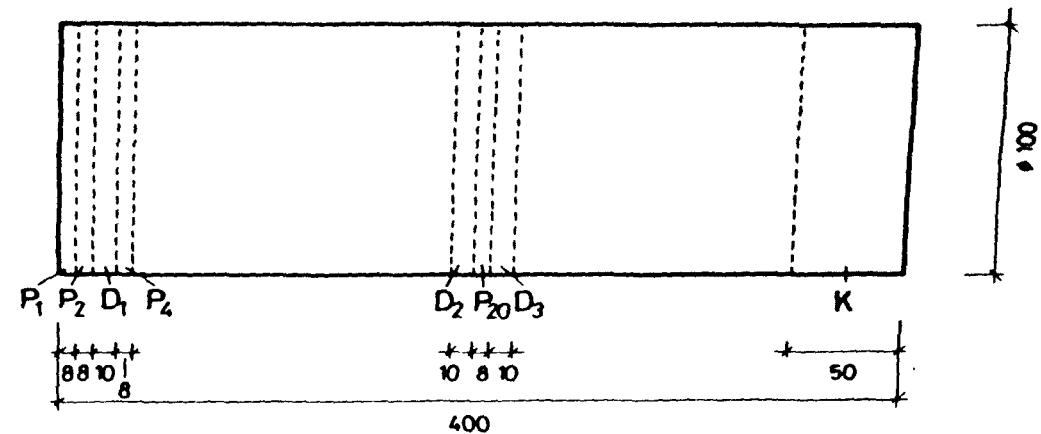
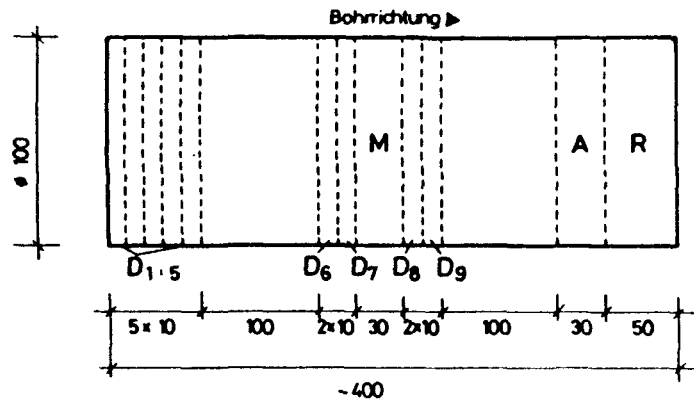
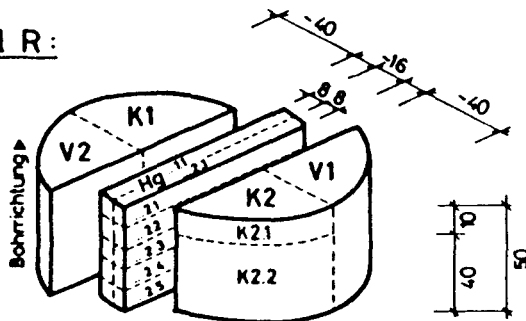


Bild B19: Darstellung der Probenabmessungen und der Lage ihrer Entnahmestellen innerhalb der 400 Tage alten Bohrkerne von Wand D und der 780 Tage alten Bohrkerne von Wand BF (Erläuterung der Abkürzungen der Probenbezeichnungen siehe Bild B18).

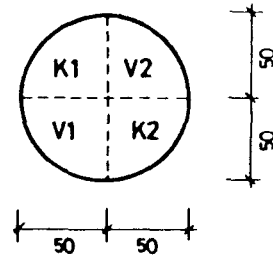
Wand AF ($t > 400$ d), BF ($t > 780$ d)



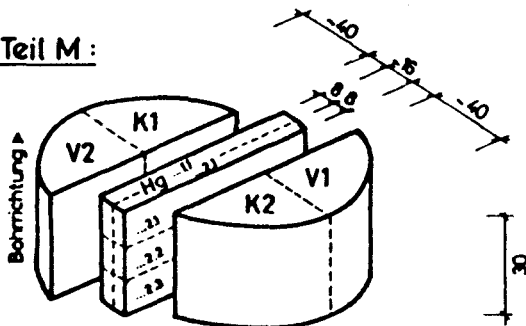
Teil R:



Teil A:

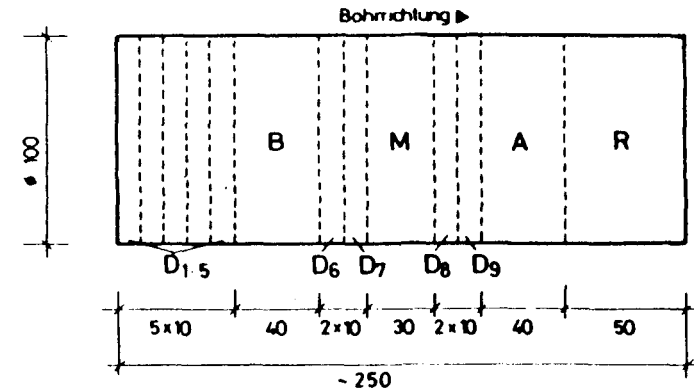


Teil M:

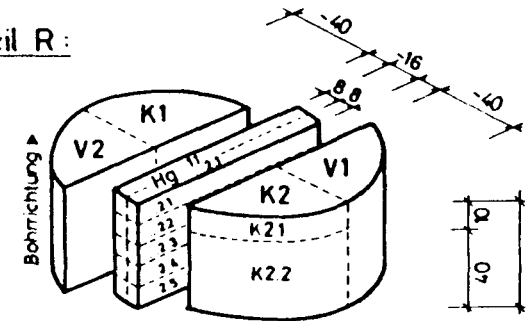


alle Maße in mm

Wand AL, BL, D ($t > 400$ d)

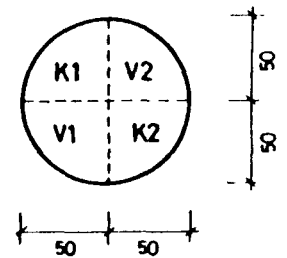


Teil R:

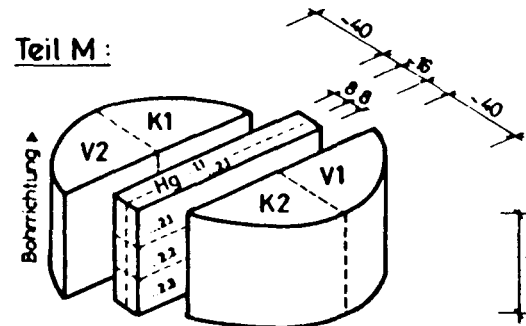


Teil A:

(Teil B analog)



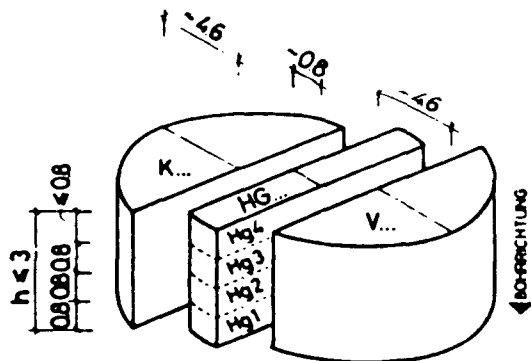
Teil M:



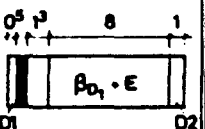
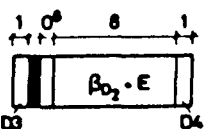
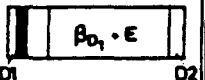
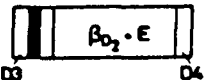
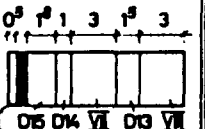
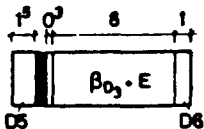

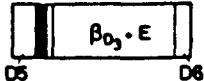
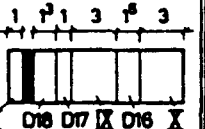
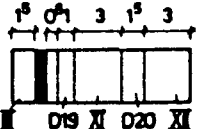


alle Maße in mm

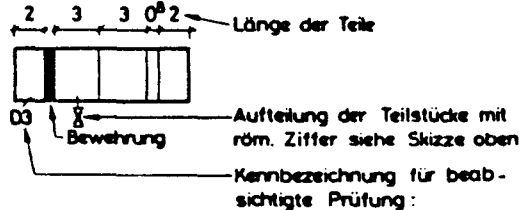
Bild B20: Darstellung der Probenabmessungen und der Lage ihrer Entnahmestellen innerhalb der 960 Tage alten Bohrkerne von Wand AF und der 1010 Tage alten Bohrkerne von Wand BF (Erläuterung der Abkürzungen der Probenbezeichnungen siehe Bild B18).

Bild B21: Darstellung der Probenabmessungen und der Lage ihrer Entnahmestellen innerhalb der mehr als 400 Tage alten Bohrkerne der Wände AL, BL und D.

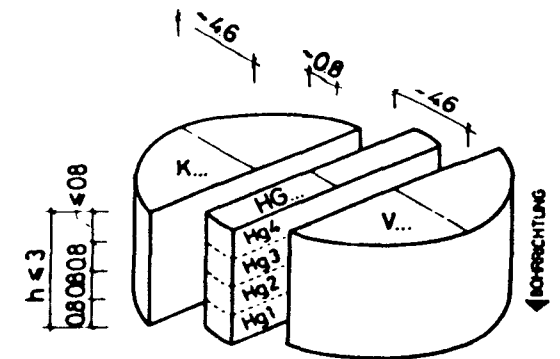


Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

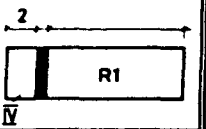
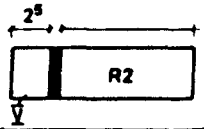
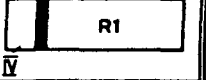

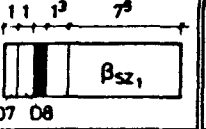
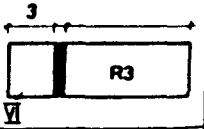
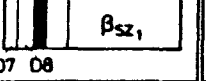
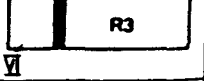
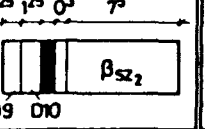
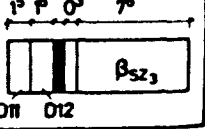
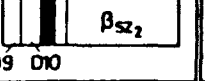
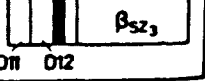
Bohrkernnummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkernnummer	Schneideskizze und Bezeichnung
1 (28d)		4 (28d)	
25 (360d)		28 (360d)	
2 (28d)		5 (28d)	
28 (360d)		29 (360d)	
3 (28d)		6 (28d)	
27 (360d)		30 (360d)	

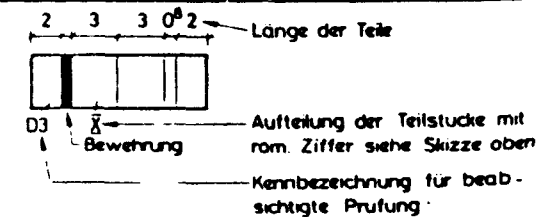


D... : CO₂-Diffusionsversuche
K... : Kapillarer Wassertransport
V... : Porosität (Vakuumsättigung)
Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie



Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

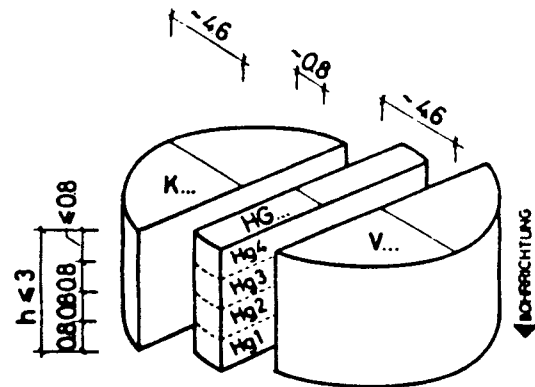
Bohrkernnummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkernnummer	Schneideskizze und Bezeichnung
7 (28d)		10 (28d)	
31 (360d)		34 (360d)	
8 (28d)		11 (28d)	
32 (360d)		35 (360d)	
9 (28d)		12 (28d)	
33 (360d)		36 (360d)	



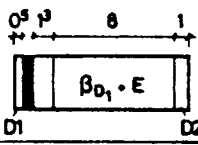
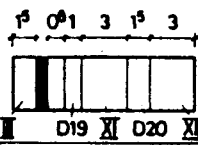
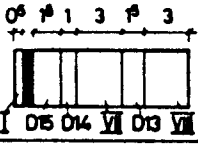
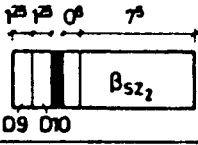
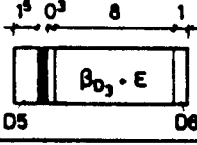
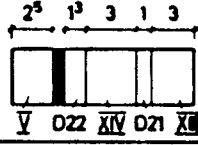
D... : CO₂-Diffusionsversuche
K... : Kapillarer Wassertransport
V... : Porosität (Vakuumsättigung)
Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie

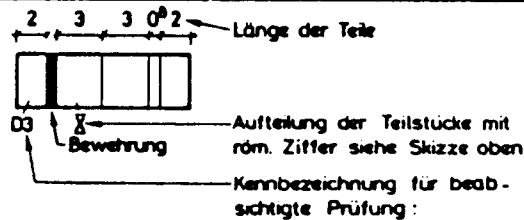
Bild B22: Sägeplan für die zum Betonalter 28 und 360 Tage den Wänden 1 - VIII entnommenen Bohrkern, 1. Hälfte (Abmessungen in cm; Aufteilung für alle 8 Wände gleich).

Bild B23: Sägeplan für die zum Betonalter 28 und 360 Tage den Wänden 1 - VIII entnommenen Bohrkern, 2. Hälfte (Abmessungen in cm; Aufteilung für alle 8 Wände gleich).



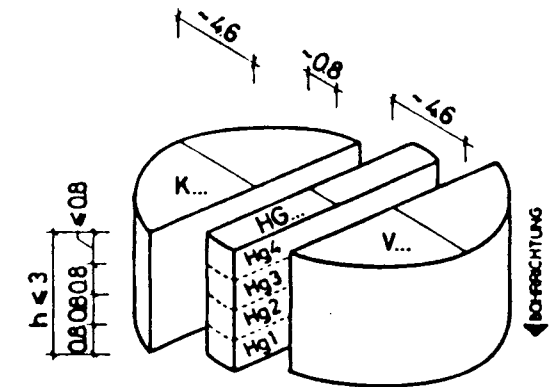
Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schnedeskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schnedeskizze und Bezeichnung
13 (90d)		16 (90d)	
14 (90d)		17 (90d)	
15 (90d)		18 (90d)	

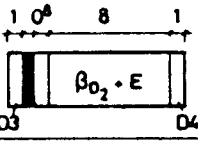
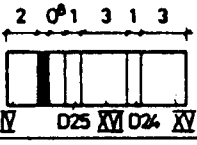
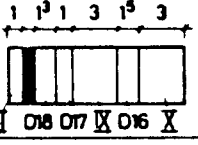
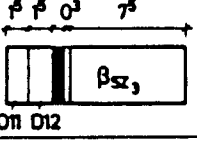
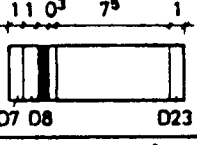
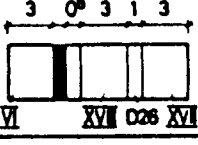


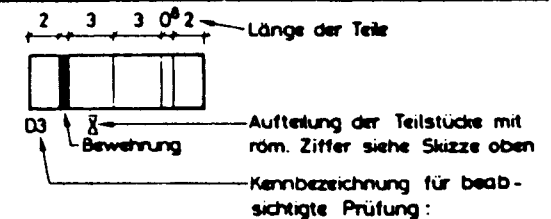
D... : CO₂-Diffusionsversuche
K... : Kapillarer Wassertransport
V... : Porosität (Vakuumsättigung)
Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie

Bild B24: Sägeplan für die zum Betonalter von 90 Tagen den Wänden I - VIII entnommenen Bohrkern (Abmessungen in cm; Aufteilung für alle 8 Wände gleich).



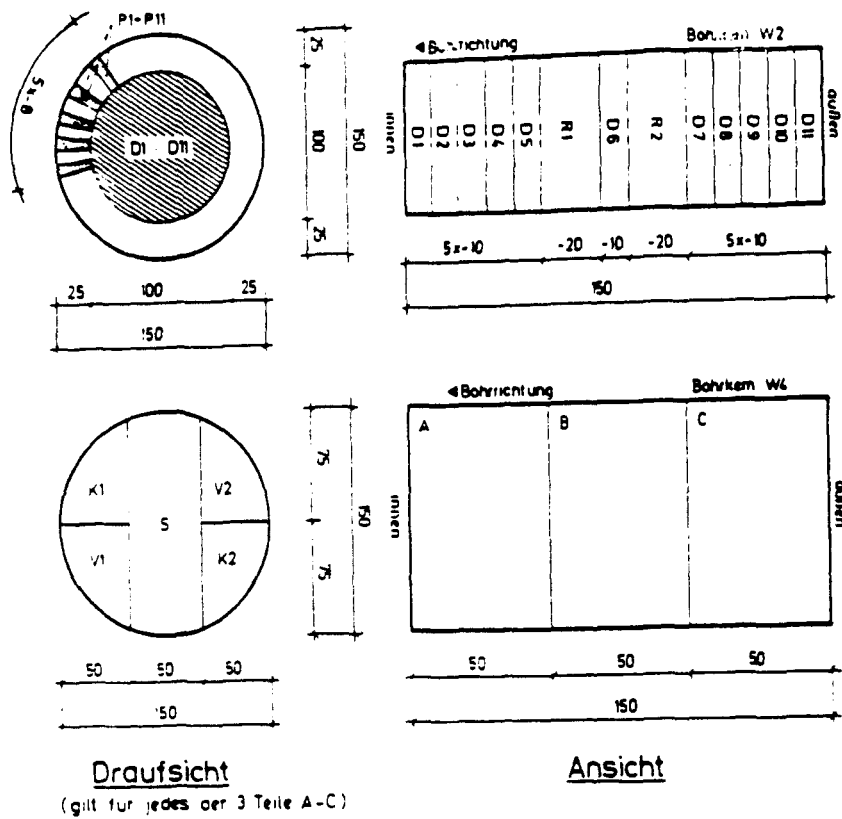
Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schnedeskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schnedeskizze und Bezeichnung
19 (180d)		22 (180d)	
20 (180d)		23 (180d)	
21 (180d)		24 (180d)	



D... : CO₂-Diffusionsversuche
K... : Kapillarer Wassertransport
V... : Porosität (Vakuumsättigung)
Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie

Bild B25: Sägeplan für die zum Betonalter von 180 Tagen den Wänden I - VIII entnommenen Bohrkern (Abmessungen in cm; Aufteilung für alle 8 Wände gleich).



alle Maße in mm

Bild B26: Sägeplan für die den Versuchshäusern in Beckum entnommenen Bohrkern.

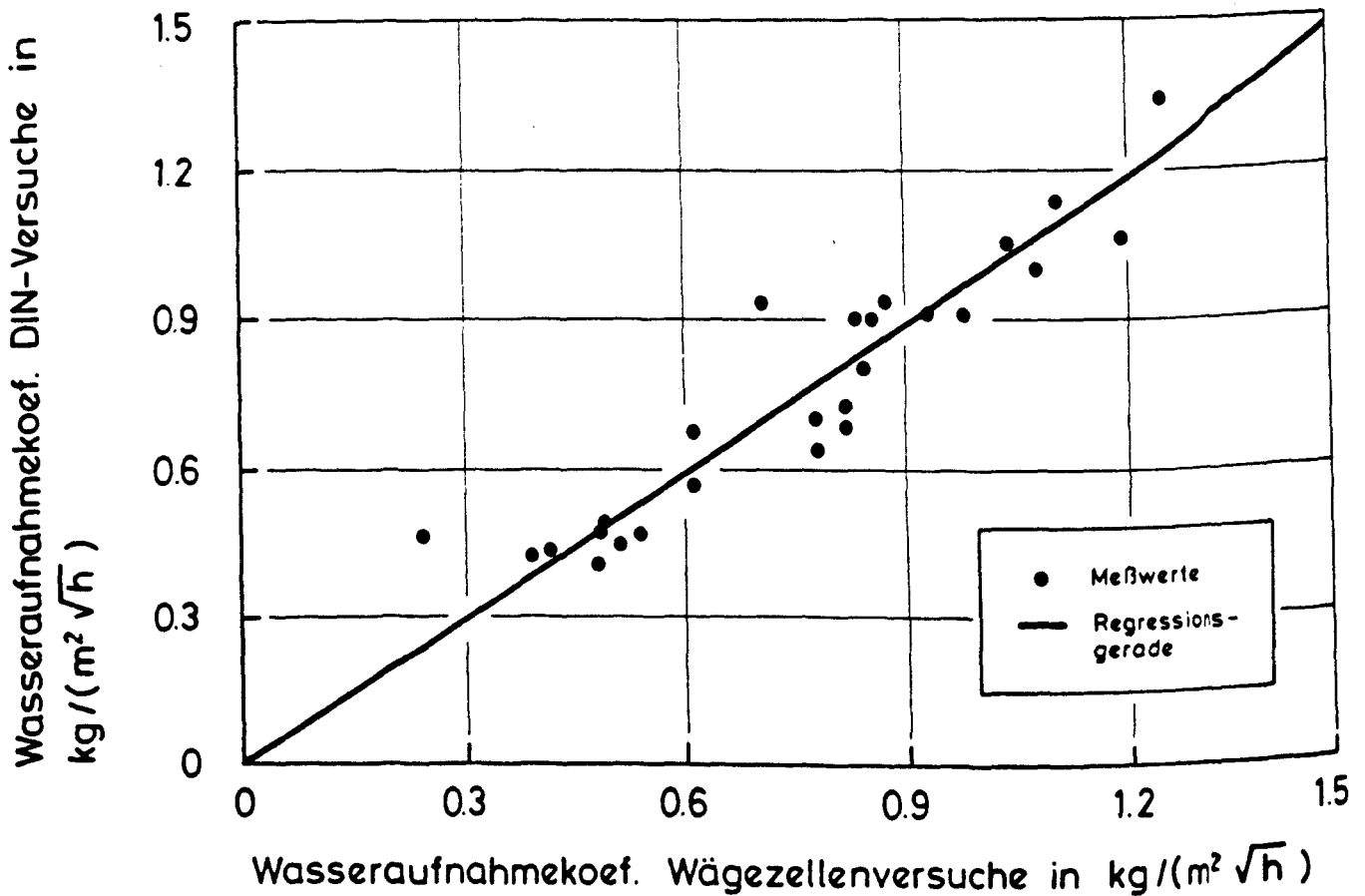


Bild B27: Vergleich des nach verschiedenen Prüfmethode an vergleichbaren Proben gemessenen Wasseraufnahmekoeffizienten.

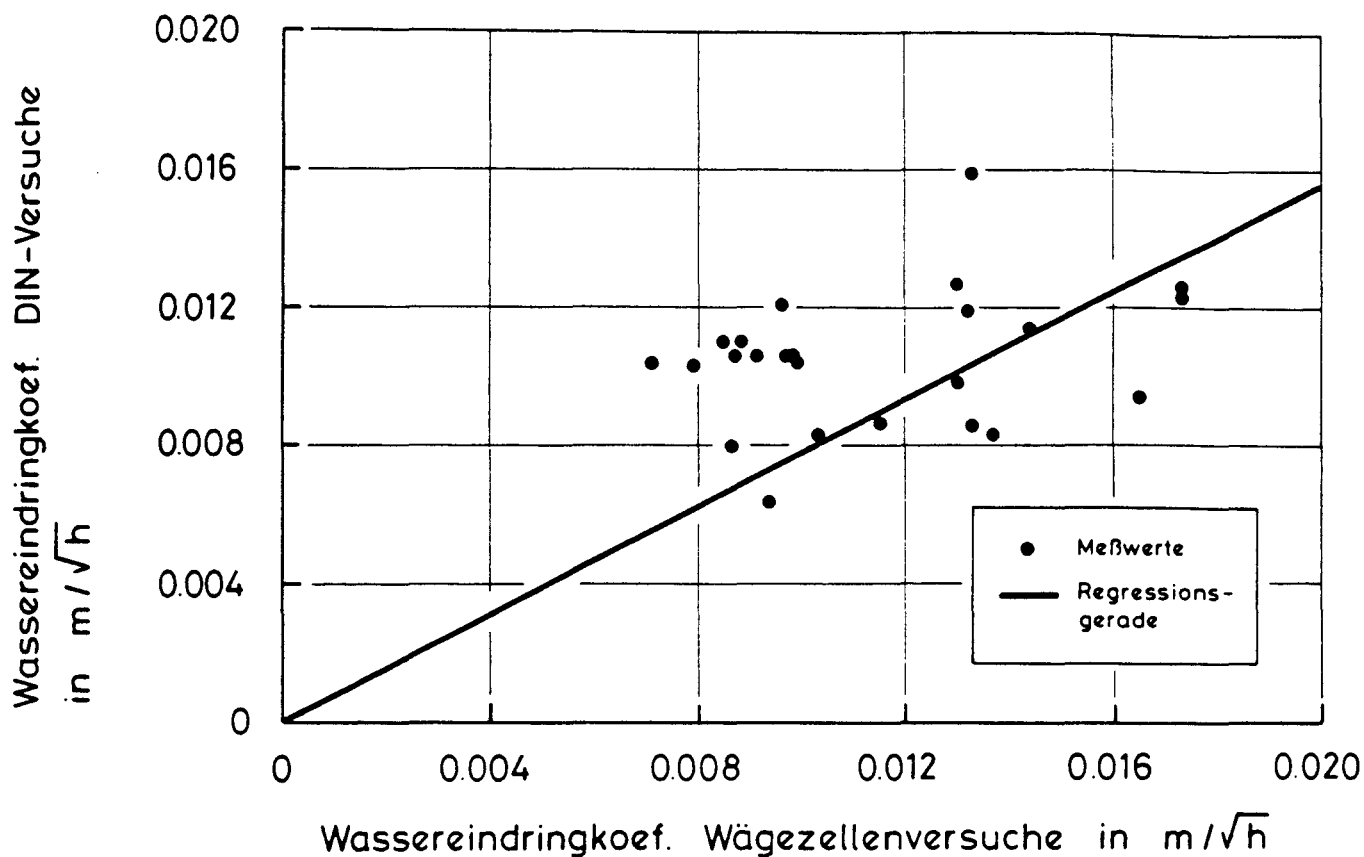


Bild B29: Vergleich des nach verschiedenen Prüfmethode an vergleichbaren Proben gemessenen Wassereindringkoeffizienten.

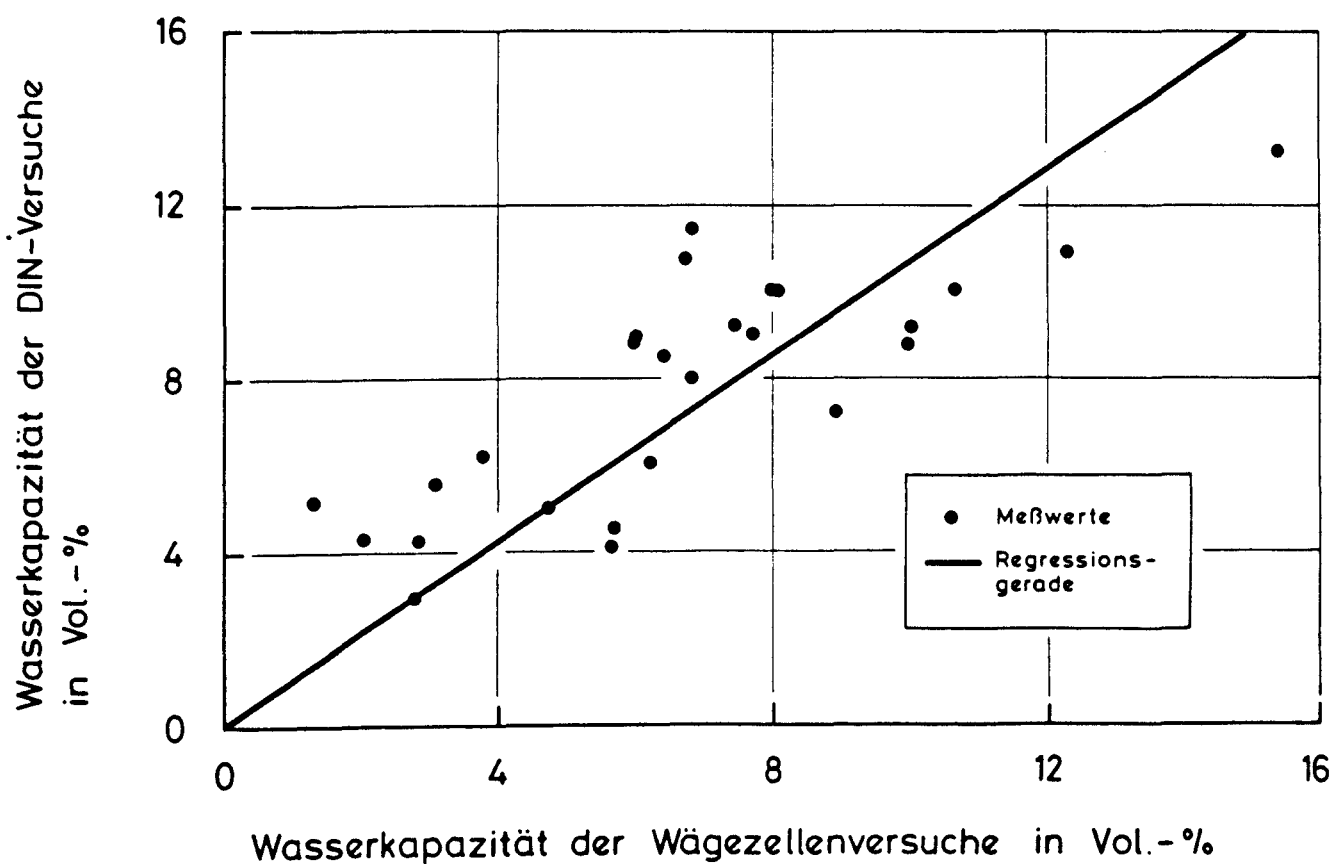


Bild B28: Vergleich der nach verschiedenen Prüfmethode an vergleichbaren Proben gemessenen Wasserkapazität.

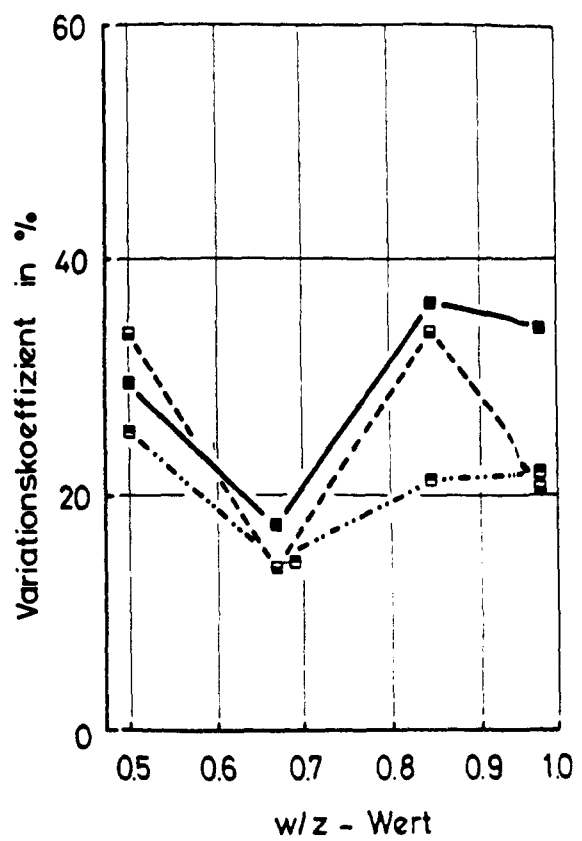
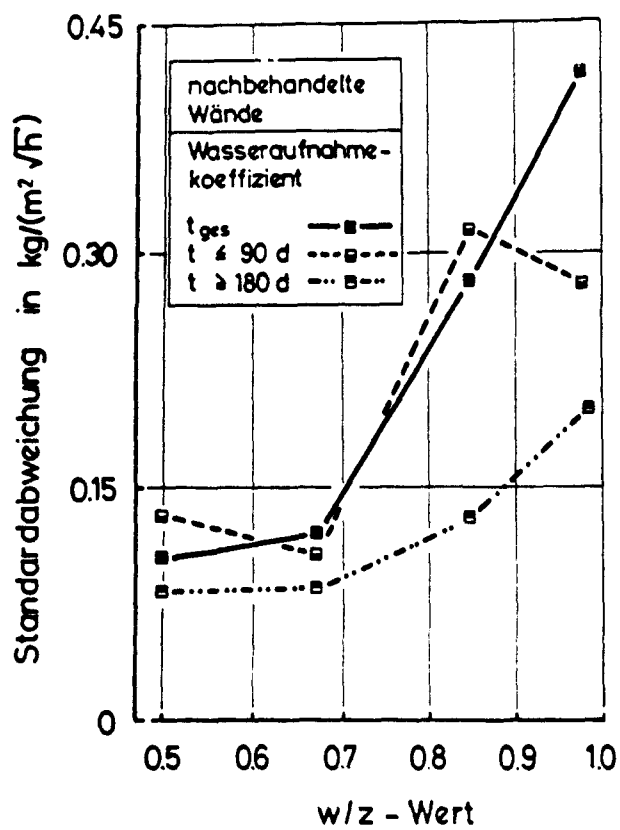


Bild B30: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des Wasseraufnahmekoeffizienten nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

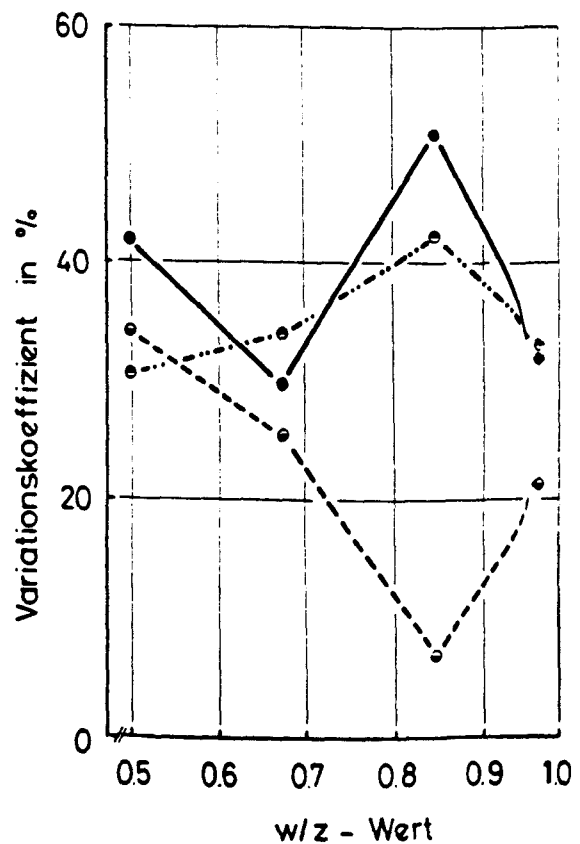
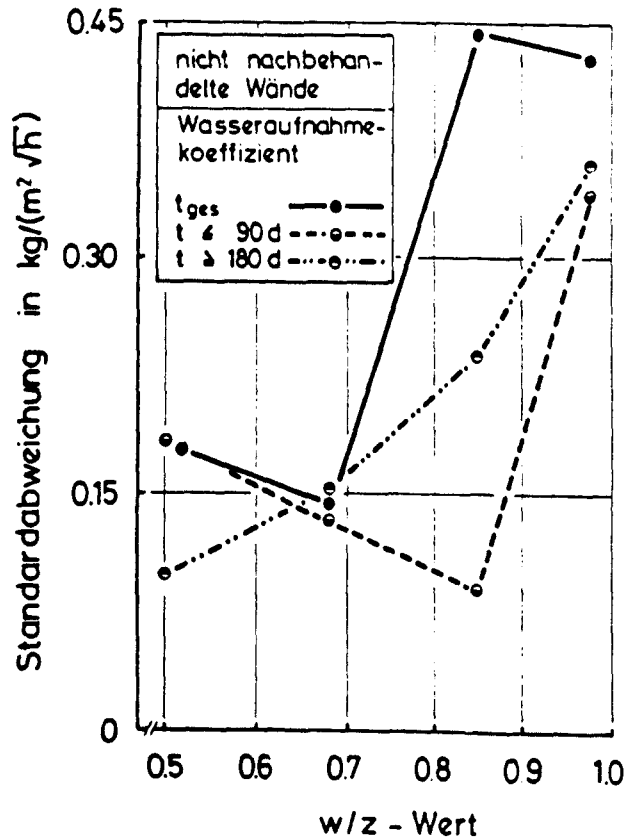


Bild B31: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des Wasseraufnahmekoeffizienten nicht nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

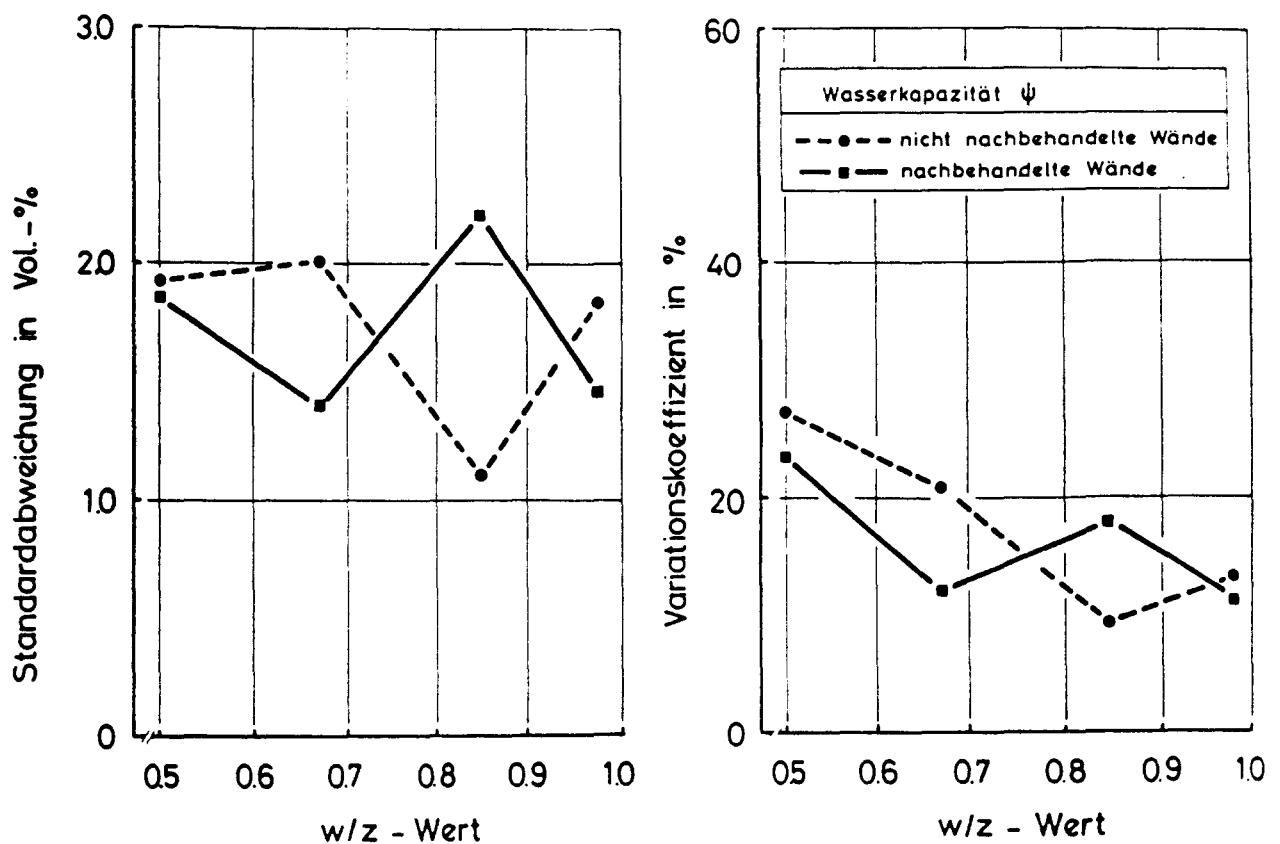


Bild B32: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der Wasserkapazität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

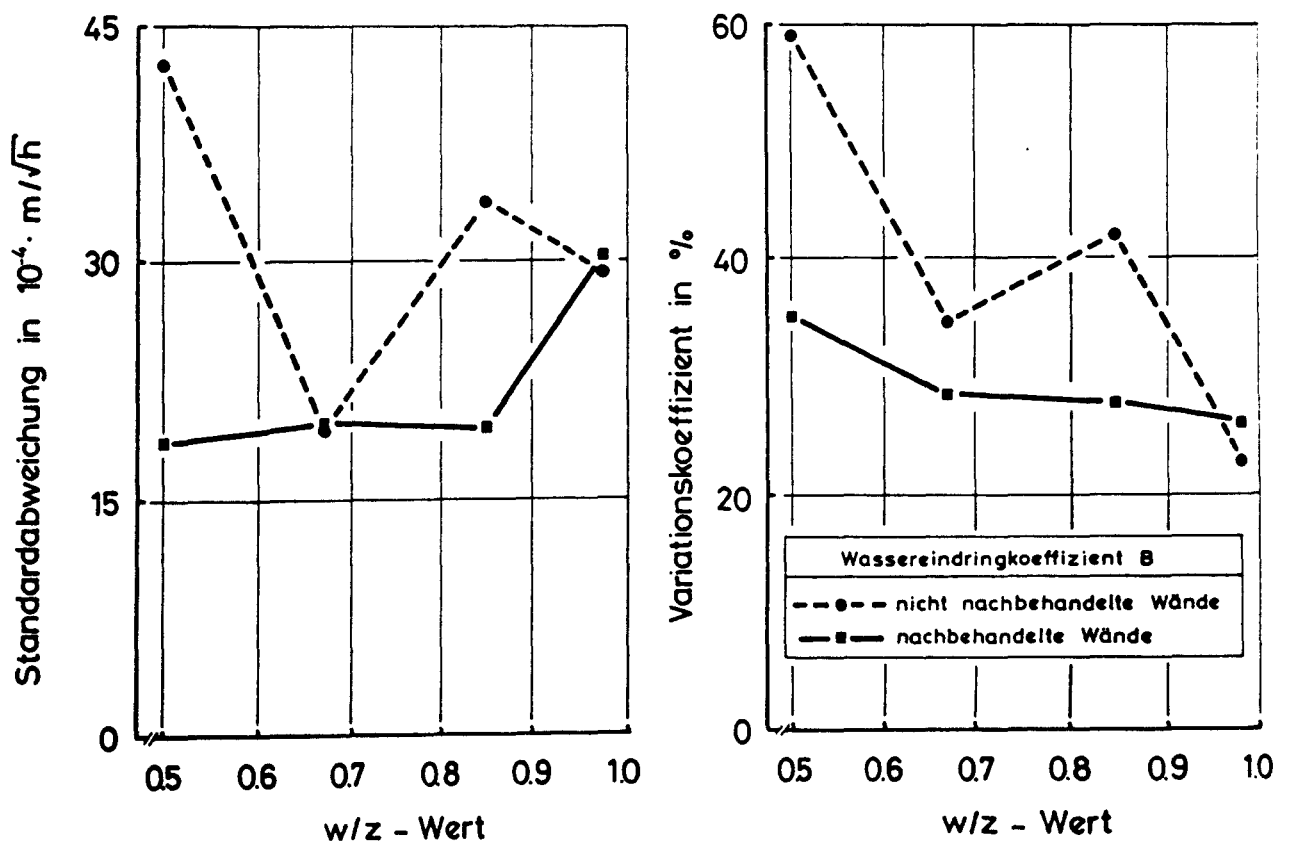


Bild B33: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des Wassereindringkoeffizienten vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I -

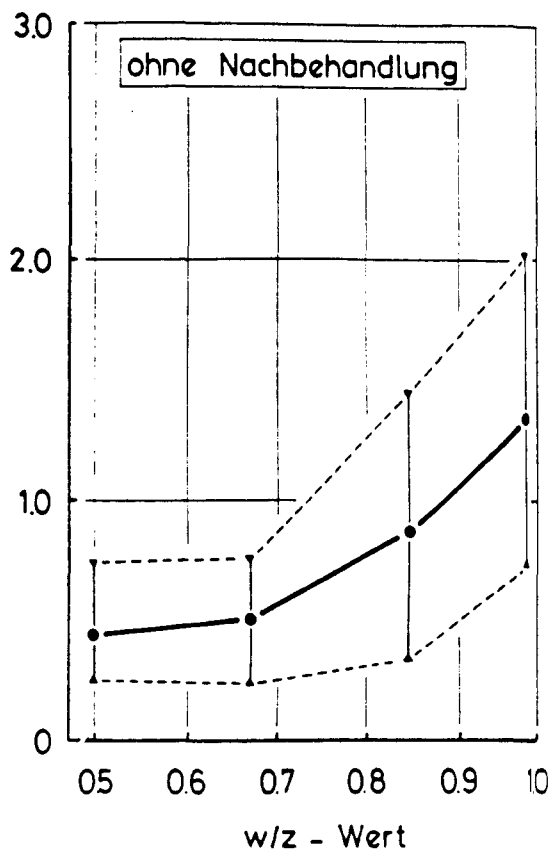
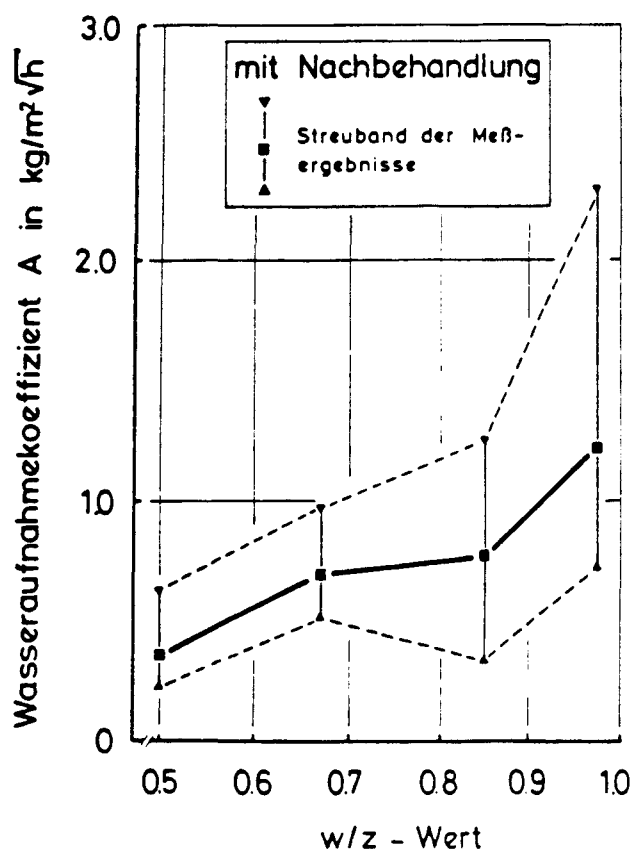


Bild B34: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des Wasseraufnahmekoeffizienten vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

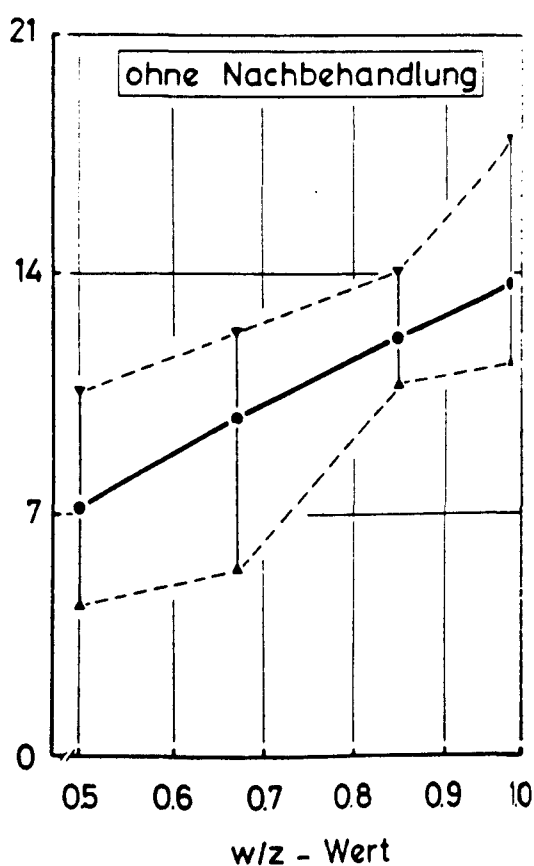
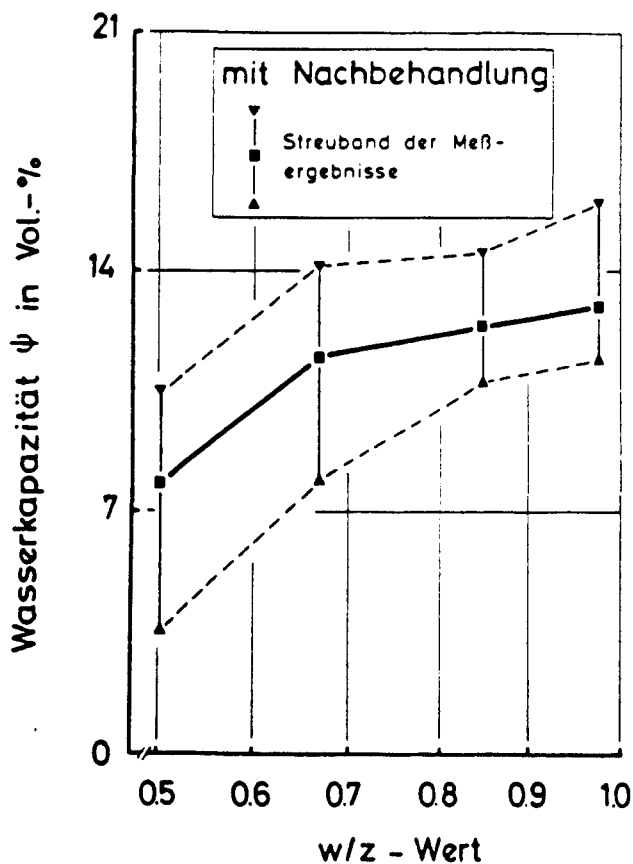


Bild B35: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes der Wasserkapazität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

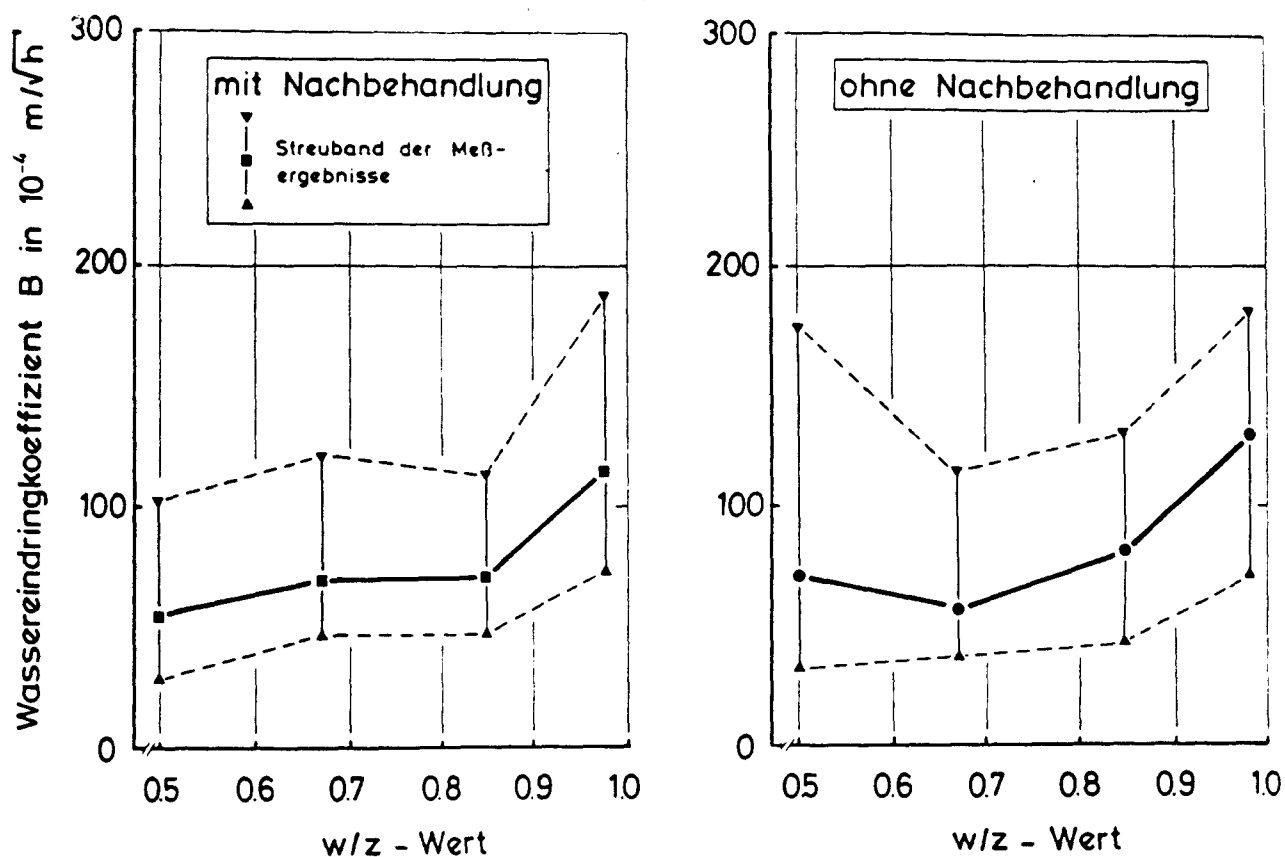


Bild B36: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des Wassereindringkoeffizienten vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

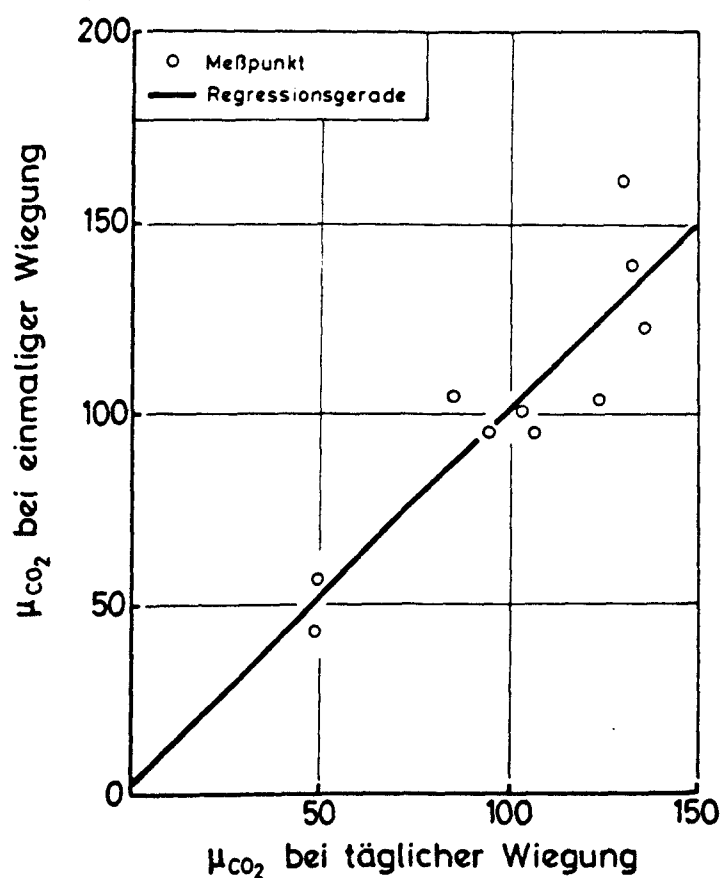


Bild B37: Ergebnisse des Vergleichs der beiden Prüfabläufe
a) tägliche Wiegung der Proben,
b) einmalige Wiegung der Proben nach 5 Tagen,
auf die Größe des CO_2 - Diffusionskoeffizienten.

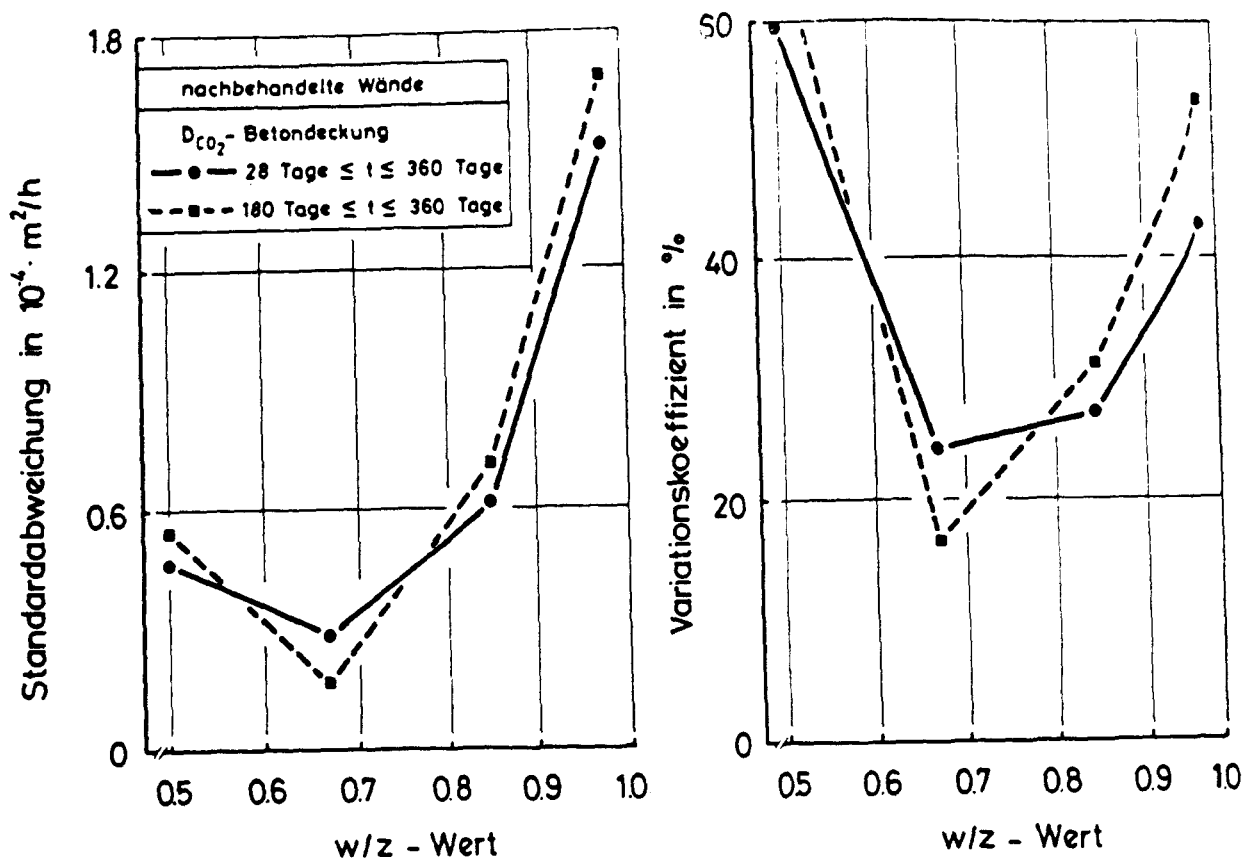


Bild B38: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des CO_2 - Diffusionskoeffizienten nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 15$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

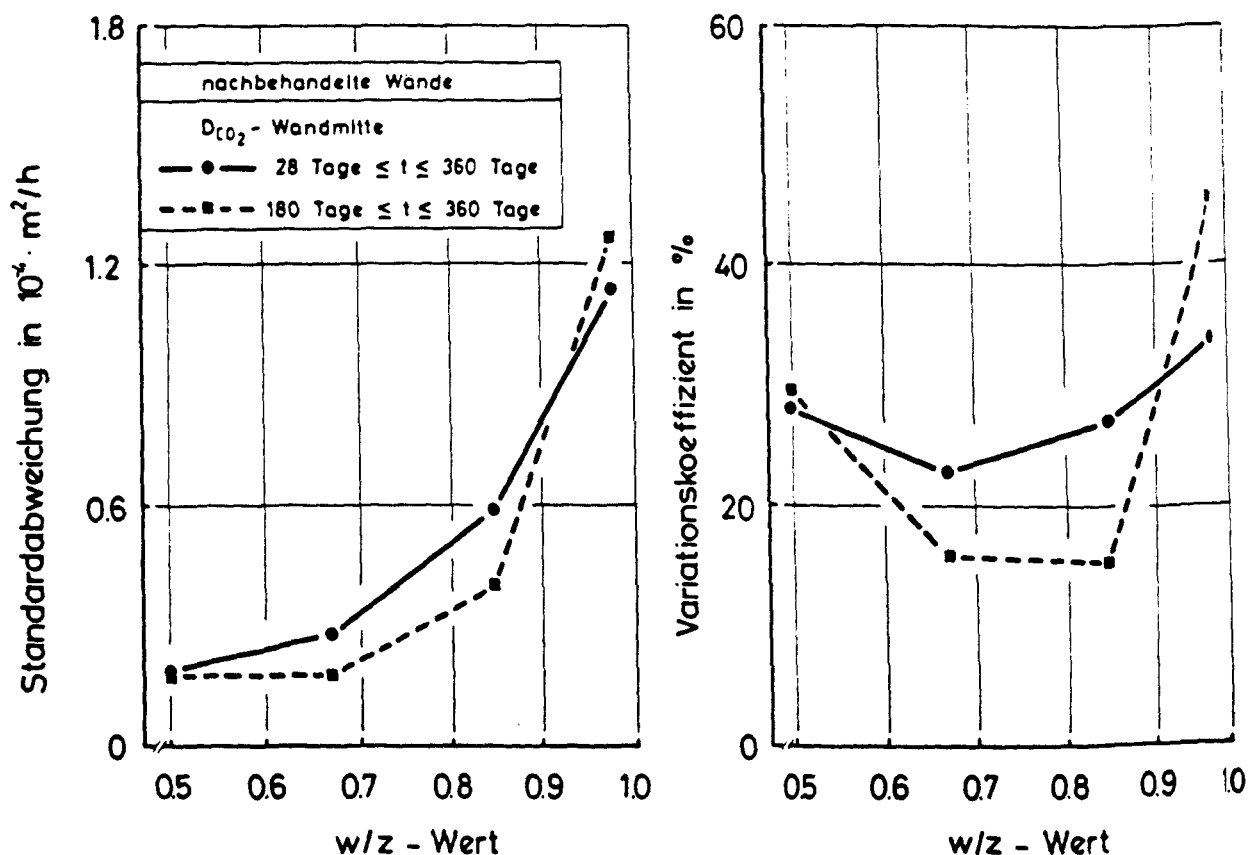


Bild B39: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des CO_2 - Diffusionskoeffizienten nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 18$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen dem Bereich der Wandmitte der Wände I - VIII).

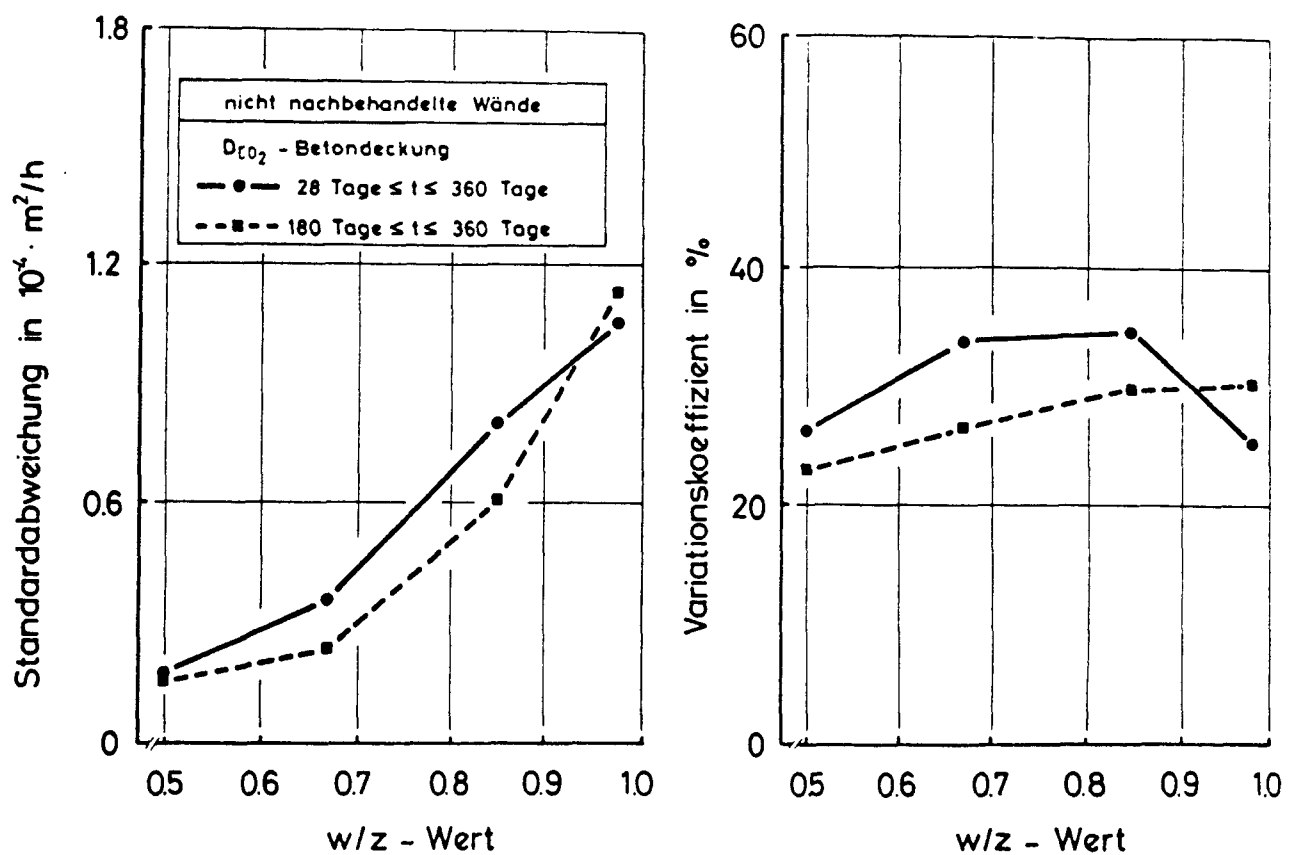


Bild B40: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des CO₂- Diffusionskoeffizienten nicht nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 15 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen den unterschiedlich dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

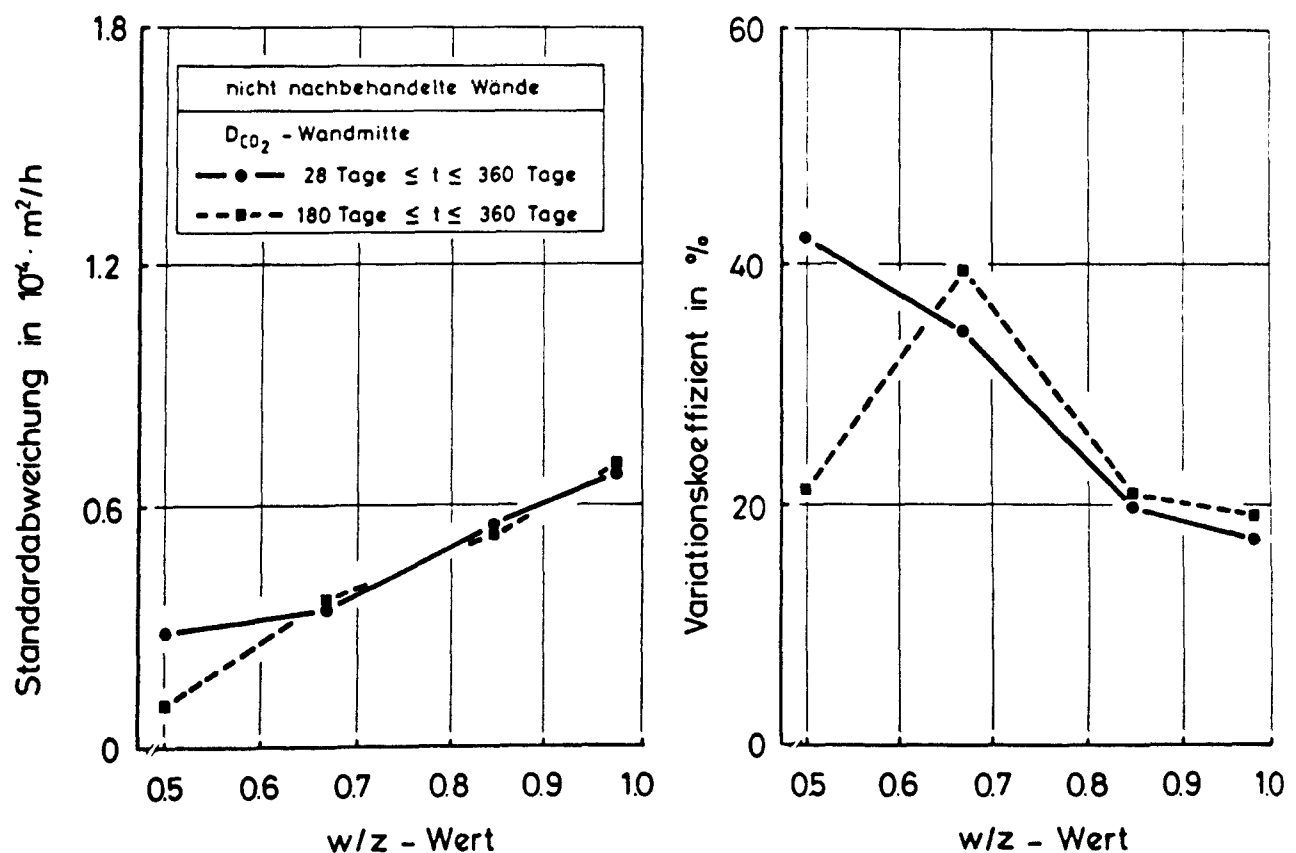


Bild B41: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten des CO₂- Diffusionskoeffizienten nicht nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen dem Bereich der Wandmitte der Wände I - VIII).

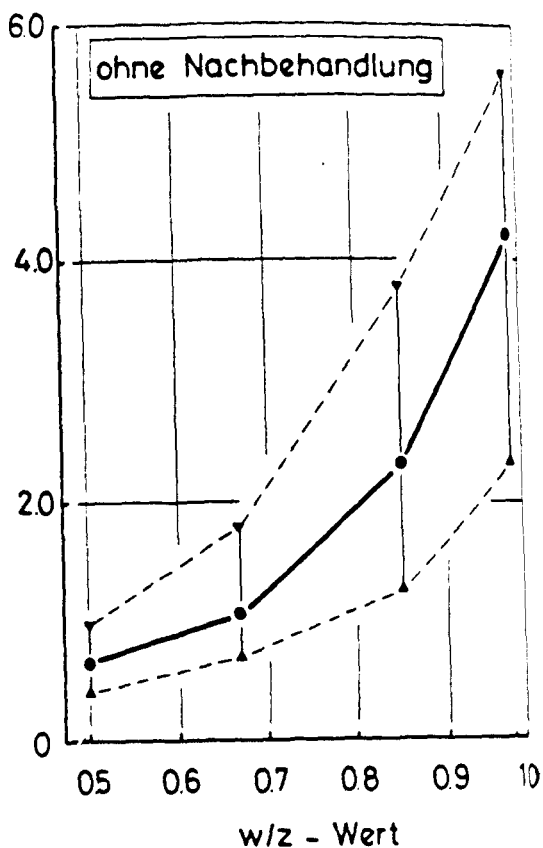
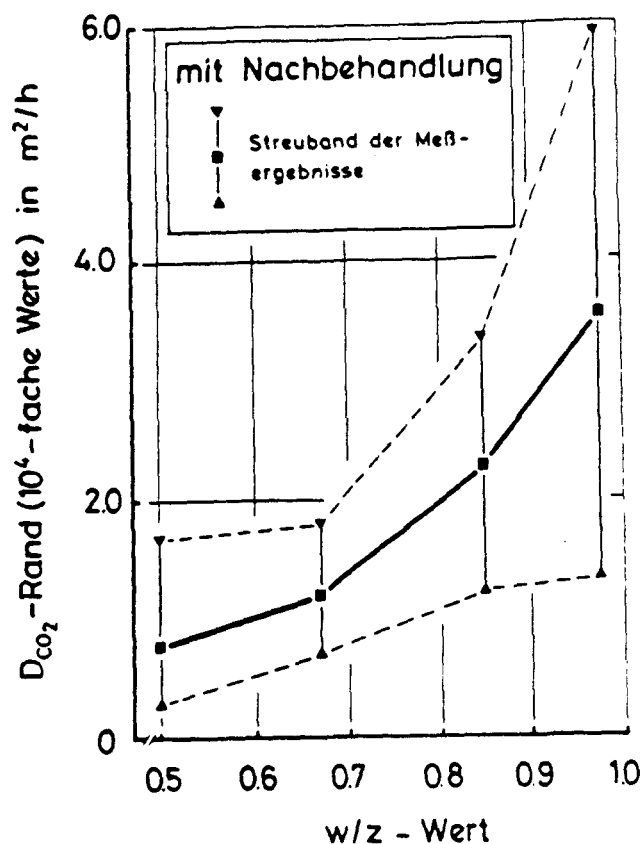


Bild B42: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des CO_2 - Diffusionskoeffizienten vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 15$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen den verschiedenen dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

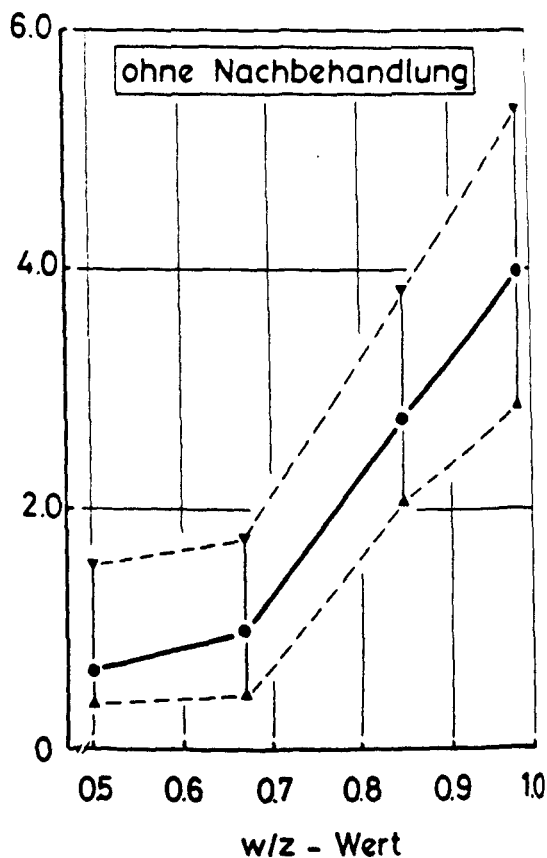
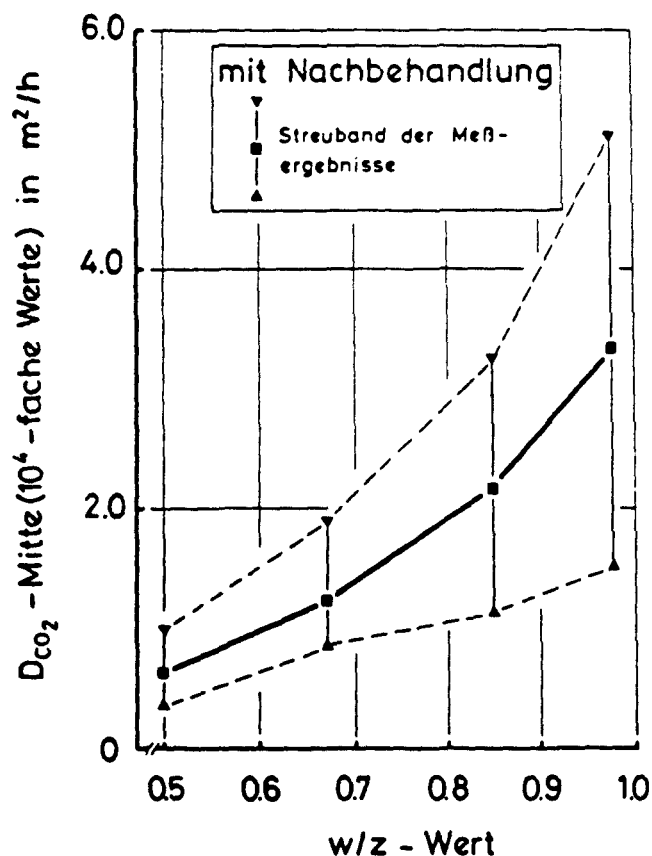


Bild B43: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des CO_2 - Diffusionskoeffizienten vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 15$ Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage und der Dicke 6 - 11 mm geprüft; die Proben entstammen dem Bereich der Wandmitte der Wände I - VIII).

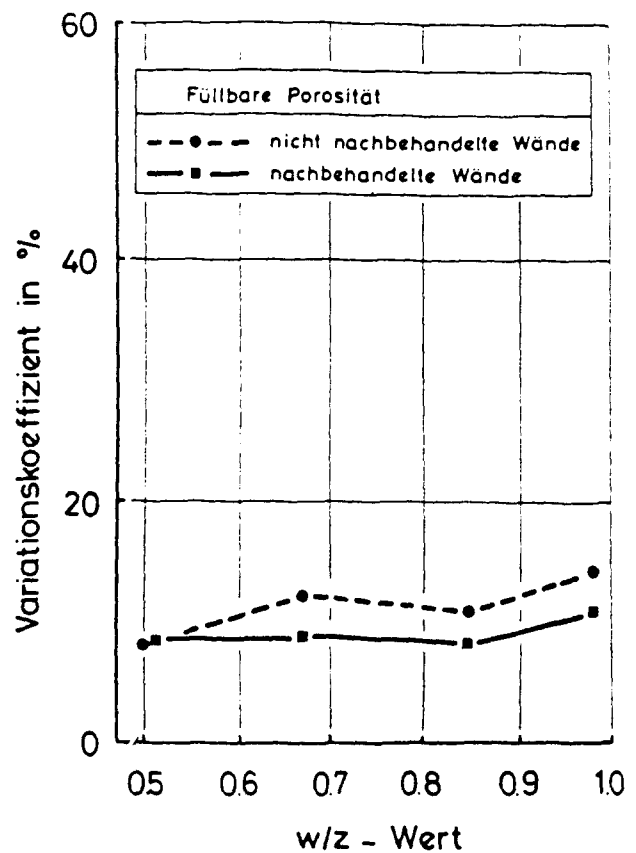
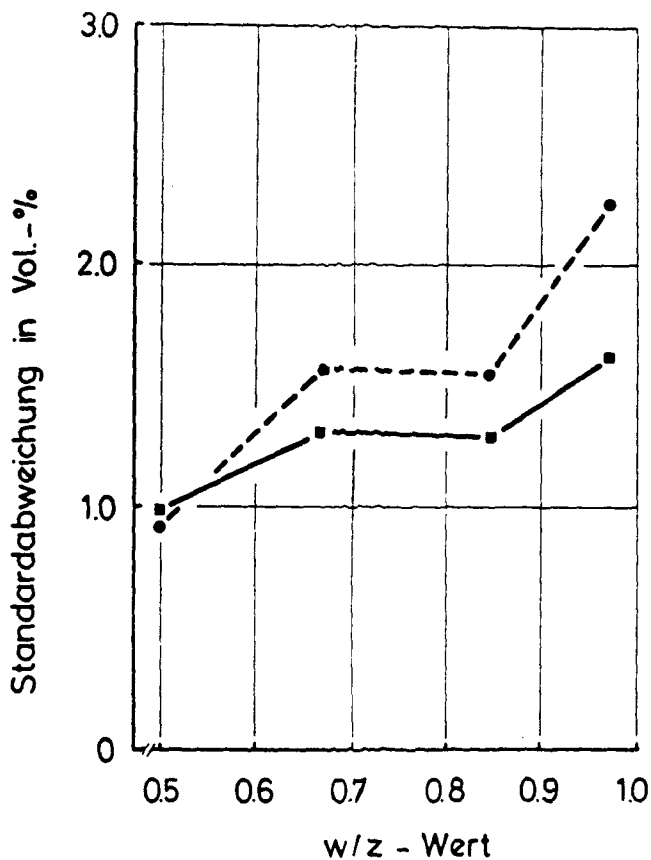


Bild B44: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der füllbaren Porosität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den verschiedenen dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

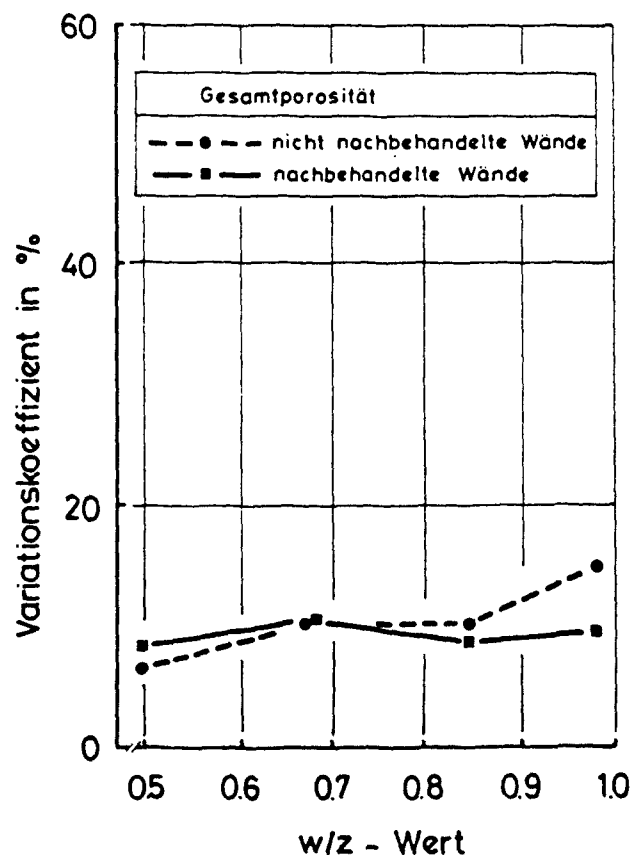
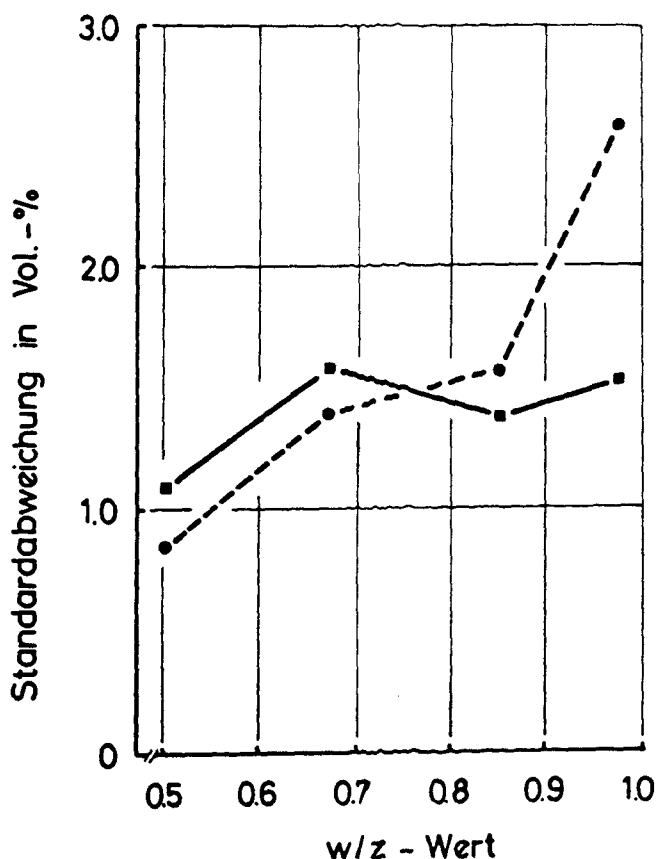


Bild B45: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der Gesamtporosität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den verschiedenen dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

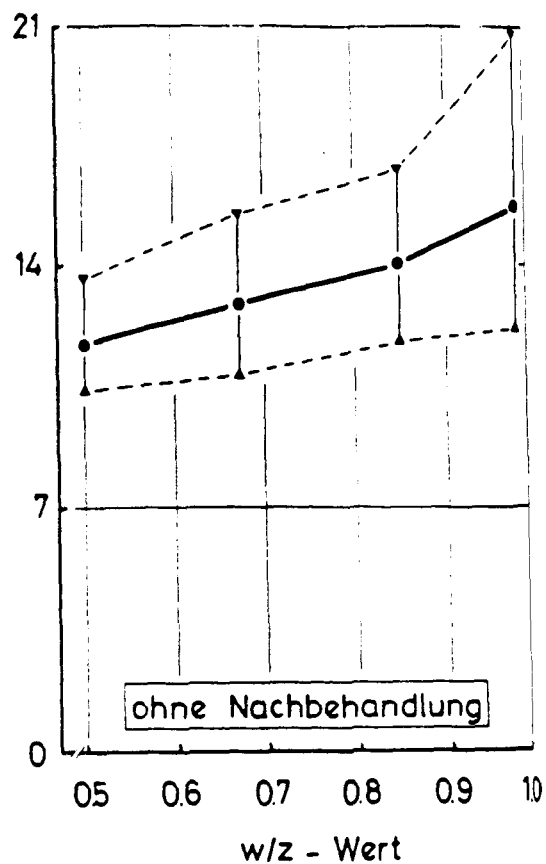
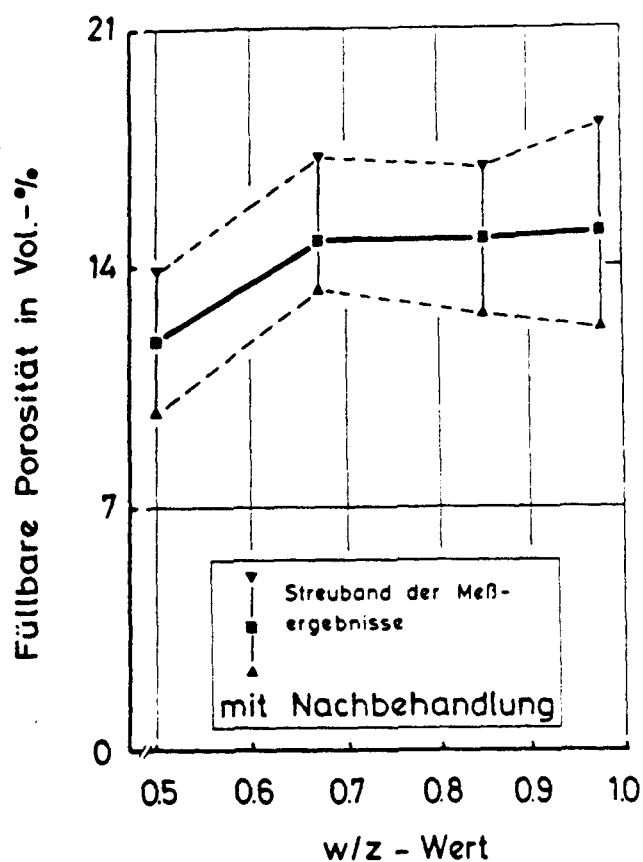


Bild B46: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes der füllbaren Porosität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28-360 Tage geprüft; die Proben entstammen den verschieden dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

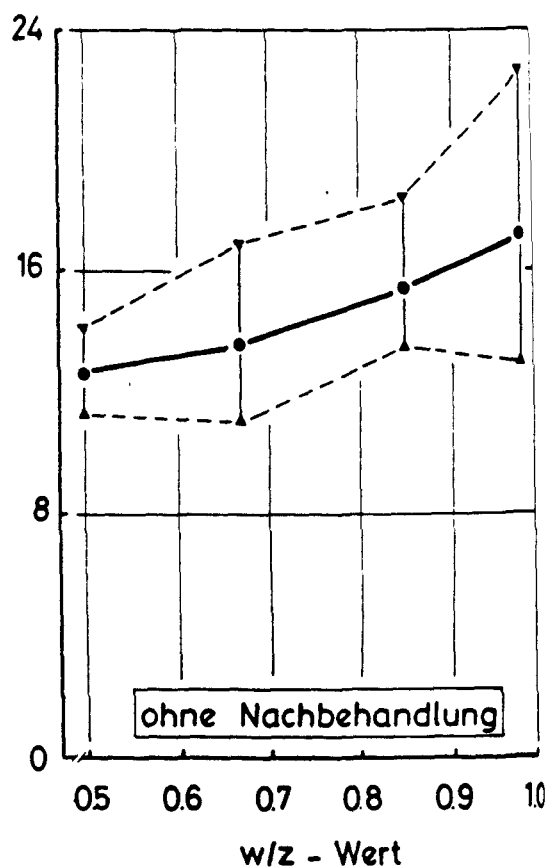
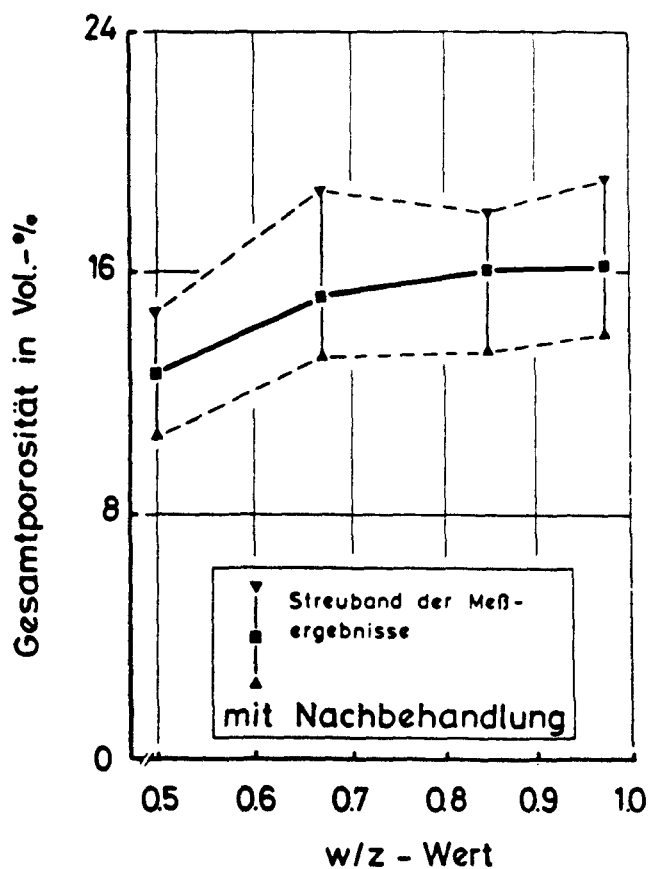


Bild B47: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes der Gesamtporosität vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 18 Proben des Altersbereiches 28 - 360 Tage geprüft; die Proben entstammen den verschieden dicken Betondeckungen der Wände I - VIII).

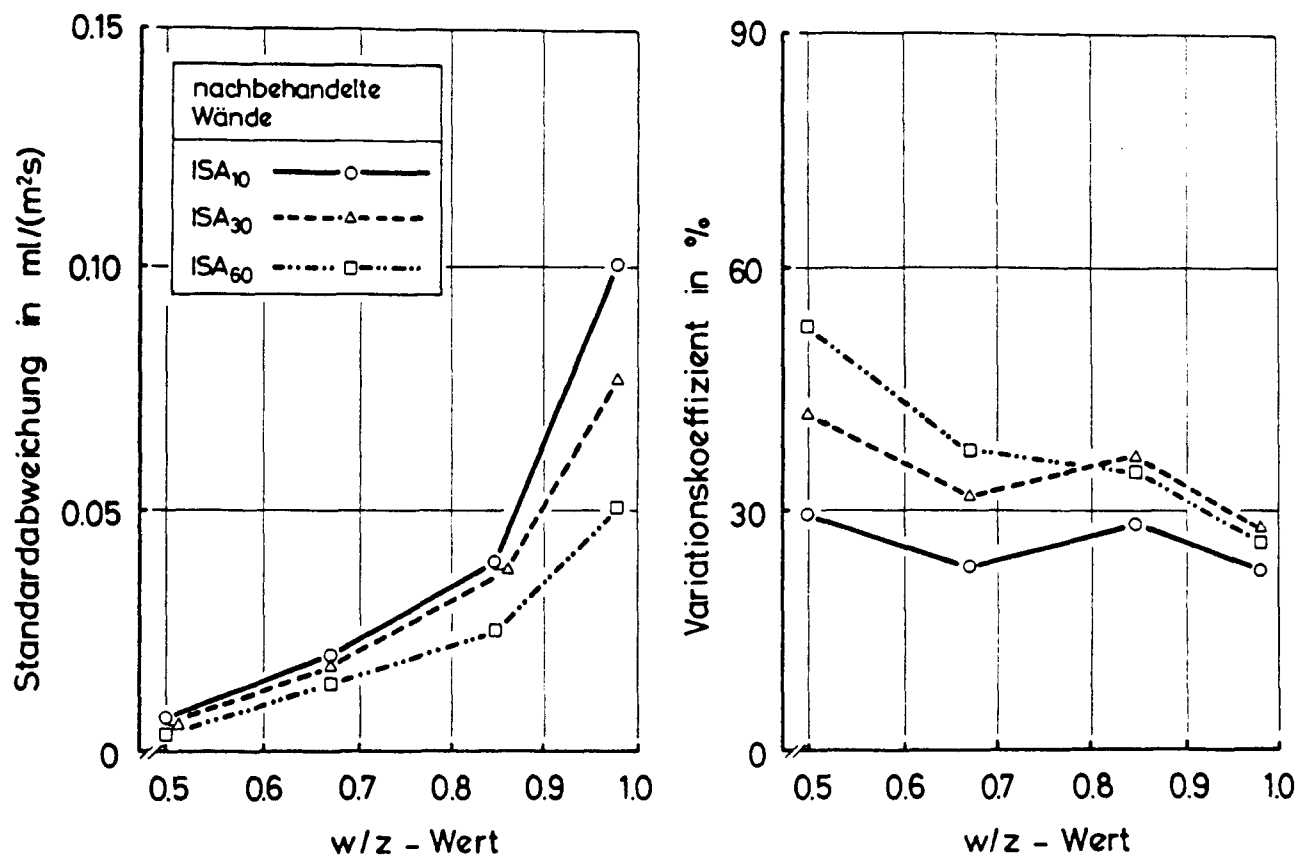


Bild B48: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der ISA_t - Werte nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 9 - 18 Messungen im Betonalter von 90 - 400 Tagen auf den Bereichen unterschiedlich dicker Betondeckung der Wände I - VIII durchgeführt).

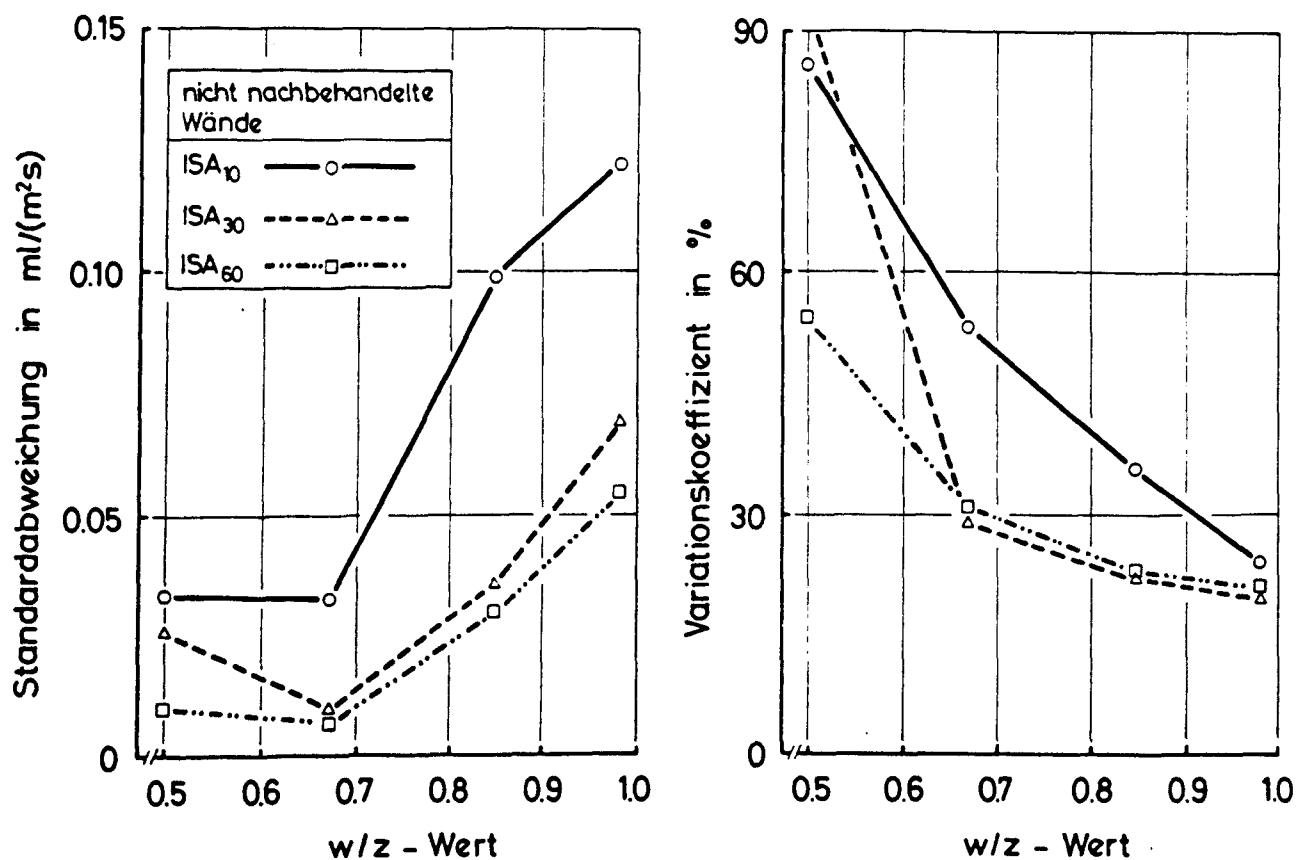


Bild B49: Abhängigkeit der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der ISA_t - Werte nicht nachbehandelter Wände vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden n = 9 - 18 Messungen im Betonalter von 90 - 400 Tagen auf den Bereichen unterschiedlich dicker Betondeckung der Wände I - VIII durchgeführt).

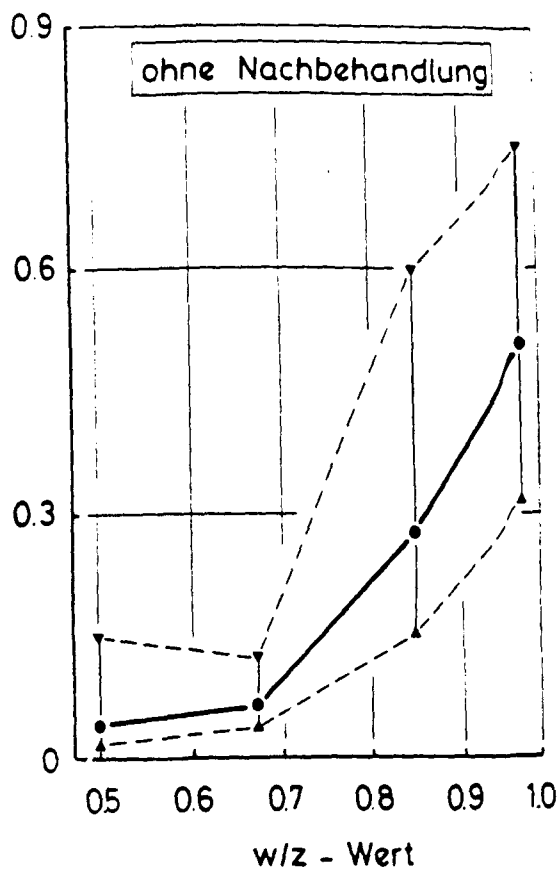
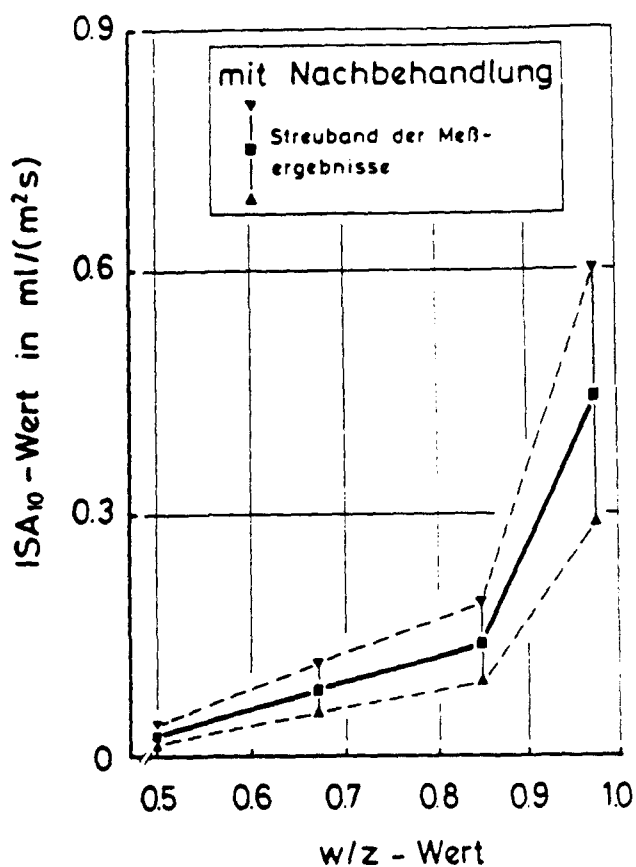


Bild B50: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des ISA_{10} - Wertes vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 9 - 18$ Messungen im Betonalter von 90 - 400 Tagen auf den Bereichen unterschiedlich dicker Betondeckung der Wände I - VIII durchgeführt).

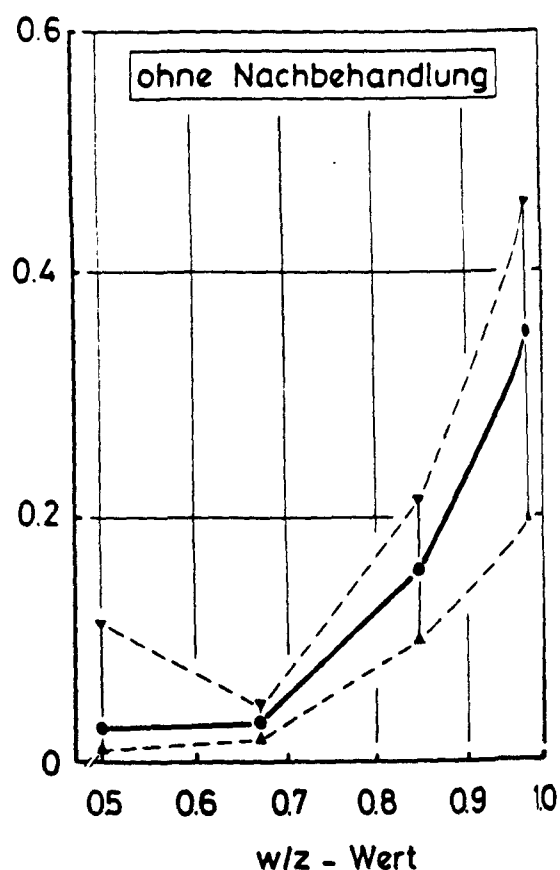
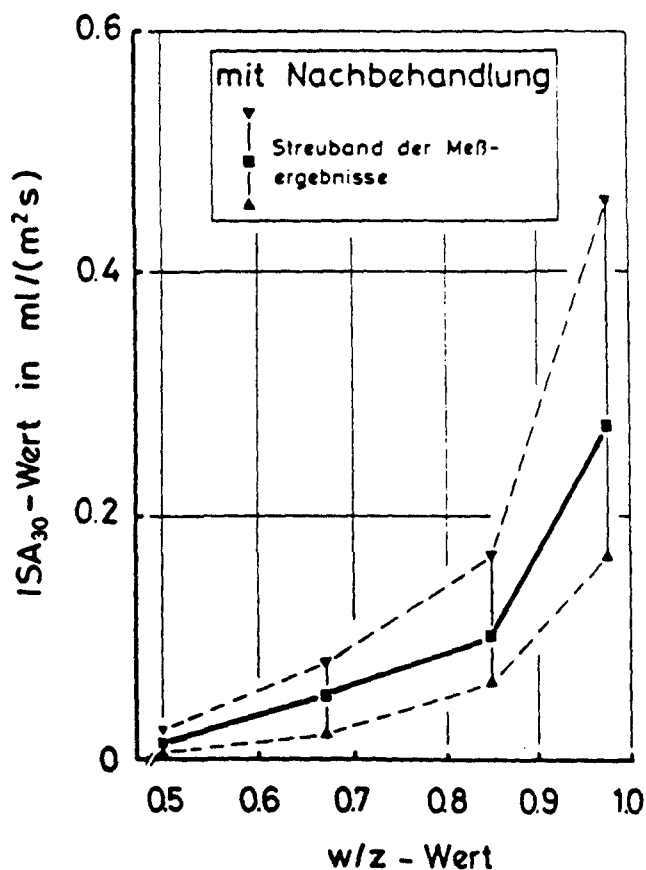


Bild B51: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des ISA_{30} - Wertes vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 9 - 18$ Messungen im Betonalter von 90 - 400 Tagen auf den Bereichen unterschiedlich dicker Betondeckung der Wände I - VIII durchgeführt).

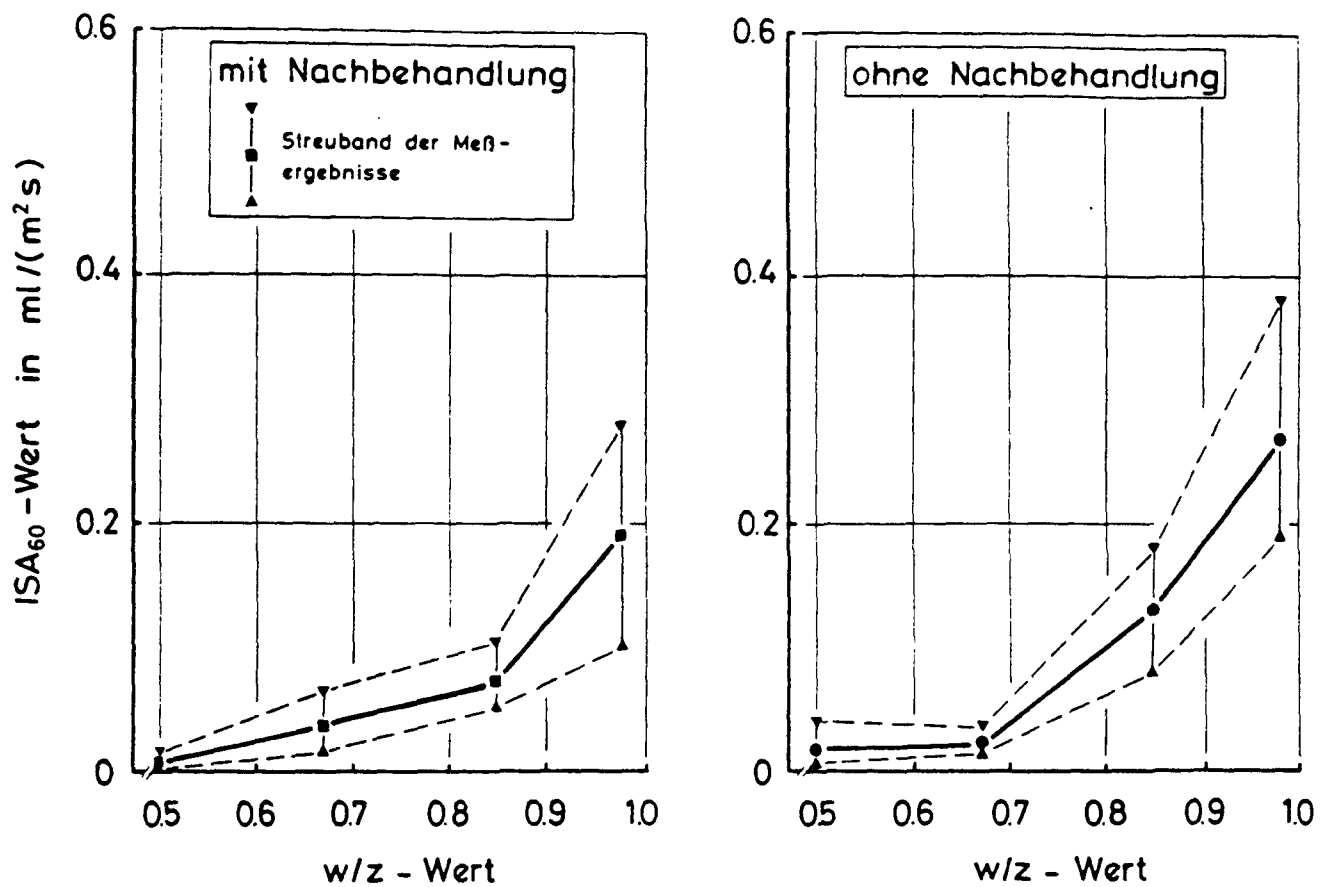


Bild B52: Abhängigkeit der Größe und des Streubandes des ISA_{60} - Wertes vom w/z - Wert (je w/z - Wert wurden $n = 9 - 18$ Messungen im Betonalter von 90 - 400 Tagen auf den Bereichen unterschiedlich dicker Betondeckung der Wände I - VIII durchgeführt).

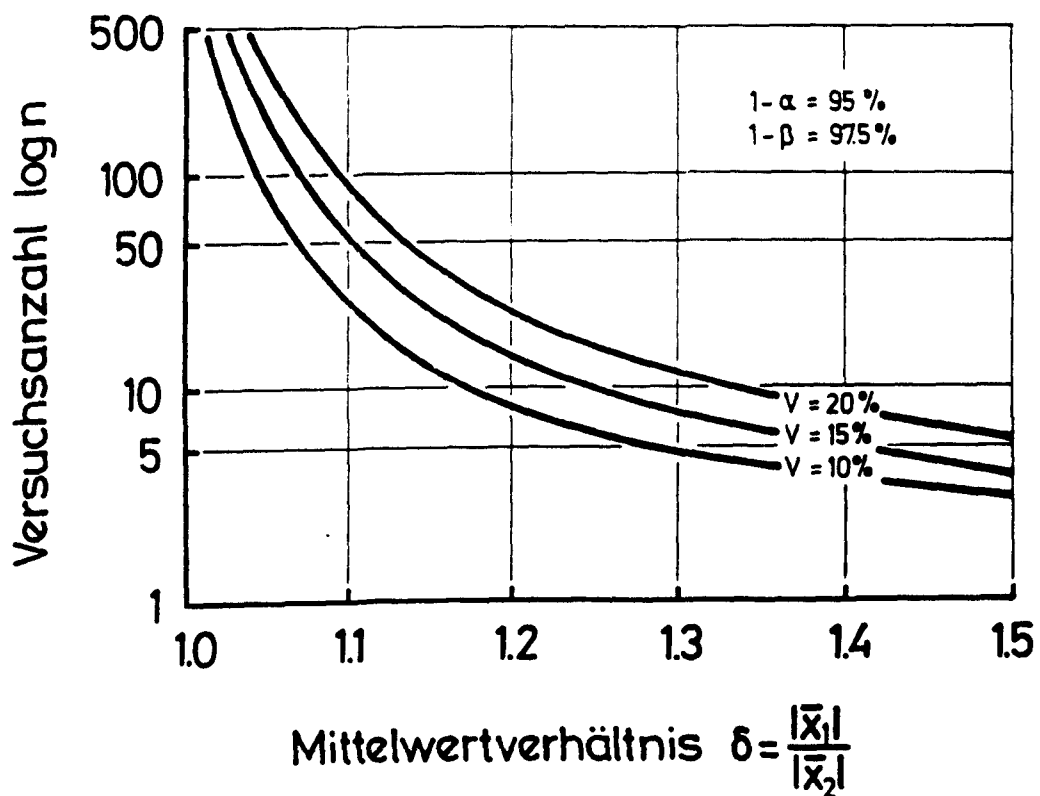


Bild B53: Erforderlicher Versuchsumfang zur signifikanten Unterscheidung der Mittelwerte zweier Versuchsserien in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten.

C. THEORETISCHE VORAUSSETZUNGEN UND METHODEN DER VERSUCHSAUSWERTUNG

1. EINLEITUNG

Entsprechend den einleitenden Bemerkungen des Abschnitts A werden im einzelnen die folgenden Forschungsziele angestrebt:

a) Ableitung und Begründung von Methoden zur Auswertung integraler und differentieller Porenradienverteilungen, zur Ermittlung aussagekräftiger Kennwerte die in direktem Bezug zu den Begriffen Betonqualität und Dauerhaftigkeit stehen und deren Quantifizierung und Beurteilung ermöglichen.

b) Untersuchung der Porosität ε und der Porenradienverteilung $\varepsilon(r)$ an den praxisnah hergestellten Betonwänden und den untersuchten bestehenden Bauwerken. Feststellung der Abhängigkeit der Porosität von den Parametern:

- Betonzusammensetzung (w/z-Wert; Zementart; Sieblinie)
- Nachbehandlungsart und -dauer
- Lagerungsbedingungen bzw. Einwirkungsintensität der Witterung
- Wandtiefe

sowie der Untersuchung des Einflusses dieser Parameter auf die altersabhängige Porositätsveränderung an Hand der unter a) abgeleiteten Kennwerte. (Diskussion der Ergebnisse getrennt für die obigen Parameter.)

c) An Hand der ermittelten Transportkoeffizienten, Feststellung der Dichtigkeit und deren zeitliche Entwicklung in Abhängigkeit der obigen Parameter.

d) Korrelation der Meßwerte Porosität und Dichtigkeit. Diese Korrelation beruht auf der Anwendung der Transportgesetze auf ein Betonporenmodell, dessen Geometrie teilweise durch die Auswertung der Porenradienverteilungen quantifiziert werden kann.

Die theoretisch abgeleiteten Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Porosität und Dichtigkeit, sollen durch diese Korrelation verifiziert werden.

- e) Auswertung der zeitgerafften Bewitterungsversuche hinsichtlich der zeitlichen Veränderung der Porosität und Dichtigkeit, in Abhängigkeit der aufgetragenen Anzahl der Witterungszyklen und der Intensität der Beanspruchungsart. Dabei ist anzugeben, ob es möglich und sinnvoll ist, Versuchszeiten der zeitgerafften Versuche in natürliche Beanspruchungszeiten zu transformieren.
- f) Prüfung und Nachweis der Eignung der eingesetzten Versuchstechniken. Die zu diesem Punkt erforderlichen Angaben können dem Abschnitt B/5 entnommen werden und wurden bereits dort behandelt.

Die physikalische Begründung für die Wahl dieser Versuchstechniken, also der Zusammenhang zwischen Meßwert und Dauerhaftigkeit, wird ohne daß dies jeweils erläutert oder durch Hinweise erhellt wird, aus den weiteren Ableitungen dieses Berichtsteils deutlich werden (siehe insbesondere die Abschnitte 3, 4 und 6).

2. MAKROMODELL DES BETONGEFÜGES

In Bild C1 ist ein Schema über die Parameter der Betondichtigkeit dargestellt (ohne unhydratisierte Zementanteile). Vereinfachend setzt sich die Betondichtigkeit aus den Anteilen der Grobstruktur infolge der Verteilung der dichten Zuschlagkörner und jenem des Zementsteins zusammen.

In diesem Abschnitt wird erläutert, mit welcher Verteilung der Körner und des Volumens des Zuschlags in Abhängigkeit des Abstands von der Schalungssinnenseite gerechnet werden kann. Auf die Dichtigkeit des Zementsteins wird anschließend eingegangen.

Die Kenntnis der volumenmäßigen Verteilung der Zuschläge über dem Wandquerschnitt ist aus folgenden Gründen bedeutsam:

1. Das Diffusionsverhalten von reinen Korn- bzw. Kugelschüttungen mit Kugeln von gleichen oder unterschiedlichen Durchmesser ist abhängig von

der Zusammensetzung der Schüttung und der Größe der Körner, wobei sich auch ohne Verwendung eines die Lücken zwischen den Körner ausfüllenden Bindemittels ein Diffusionswiderstand ergibt.

2. Von Untersuchungen an Kugelschüttungen mit Kugeln gleichen Durchmessers ist bekannt, daß im Bereich der Gefäßwand das Volumen der Zwischenräume zwischen den Kugeln, das Lückenvolumen, deutlich zunimmt. Bild C2 zeigt entsprechende Versuchsergebnisse nach [C1]. Die obere Darstellung von Bild C2 macht deutlich, daß erst ab einem Wandabstand von ca. dem 3-fachen des Kugeldurchmessers annähernd mit einem konstanten Lückenvolumen gerechnet werden kann. Unmittelbar an der Behälterwandung beträgt das Lückenvolumen 100 %. Dazwischen ergibt sich naheliegenderweise auch für nicht systematisierte sondern zufällige Kugelschüttungen ein oszillierender Verlauf des Lückenvolumens.

Diese Ergebnisse können nicht unmittelbar auf Betonzuschlag übertragen werden, da

- a) Zuschlagkörner nicht ideal rund sind,
- b) eine Sieblinie im Normalfall ein stetiges Gemisch von Körnern mit unterschiedlichem Durchmesser ist,
- c) die Zementleimenge nicht nur dazu ausreicht, daß Lückenvolumen zwischen den Zuschlägen auszufüllen, sondern auch die Körner mit einer Zementleimschicht umhüllt, so daß sich diese nicht mehr berühren.

Dagegen ist es auch für Beton so, daß

- a) unmittelbar an der Schalungsoberfläche bei idealisierter Betrachtung allenfalls ein punktförmiger Kontakt zwischen Zuschlagkorn und Schalungswand besteht und damit das Lückenvolumen zwischen den Zuschlägen 100 Vol.-% betragen muß,
- b) in Wandmitte näherungsweise ein konstantes Lückenvolumen vorliegt, das i.M. der Betonzusammensetzung entspricht,

- c) anzunehmen ist, daß sich auch für Korngemische ein oszillierender Übergang des Lückenvolumens von der Schalungswand bis zur Wandmitte ergibt, das von der Sieblinie beeinflusst wird.

Den Einfluß der Sieblinie und des Größtkorndurchmessers auf die Diffusionsdichtigkeit zeigen die Ergebnisse [C2] über Messungen des Diffusionswiderstands an Mörtel und Betonproben, siehe Tab. C1. Demnach ist Beton 2 bis 7-mal dichter als Mörtel.

Vorrangig sind die beiden folgenden Gründe dafür verantwortlich:

- a) Mit abnehmendem Korndurchmesser nimmt die spezifische Oberfläche des Zuschlags zu, so daß ein größerer Verbundzonenanteil mit geringerer Dichtigkeit entsteht.
- b) Eine stetige Sieblinie, die sich an einer optimalen Packungsdichte der Zuschläge entsprechend der Fuller-Parabel orientiert, weist ein geringeres Lückenvolumen auf als Zuschlag nur einer Kornfraktion. Außerdem werden die Umwege um die Zuschlagkörner umso größer, je dichter die Packungsdichte ist; beides erhöht den Diffusionswiderstand.

2.1 Modell der Verteilung von Zuschlag und Zementstein unter Beachtung des Einflusses der Schalung

Vereinfachend wird für die folgenden Ableitungen eine Unterteilung der Betonbestandteile in die beiden Gruppen

- Zuschlag größer 2 mm und
- Zementleim einschließlich Feinsand 0 - 2 mm (Feinmörtel)

vorgenommen. Näherungsweise wird außerdem davon ausgegangen, daß sich der Feinmörtel unabhängig vom Wandabstand gleich zusammensetzt, bzw. unter Beachtung der zuvor zitierten Ergebnisse über Versuche mit Kugelschüttungen sich allenfalls eine Randzone von weniger als $3 \times 2 = 6$ mm Länge einstellt, auf der eine gegenüber der mittleren Zusammensetzung abweichende Feinsandverteilung vorliegt.

Dem Feinmörtel kommen zwei Aufgaben zu:

- a) Füllung des Lückenvolumens zwischen dem Grobsand- und Kieskörnern (hauptsächlich durch den Feinsand).
- b) Bildung eines geschlossenen Zementleimfilms auf den Zuschlagoberflächen (hauptsächlich durch Zementleim und Mehlkorn) der Zuschläge > 2 mm. Versuchsergebnisse zeigen, daß die dünnste Zementsteinschicht zwischen zwei Zuschlägen eine Mindestdicke von $100\text{ }\mu\text{m}$ hat [C3].

Nimmt man diese Einteilung für die Wände A -D vor, so reicht deren Feinmörtelanteil aus, um beide Aufgaben erfüllen zu können. Bei den Wänden A und B macht er ungefähr $2/3$ des Volumens aus.

Die Entwicklung eines Modells für die Verteilung von Feinmörtel und Grobzuschlag in Abhängigkeit des Abstands von der Schalungskante ist auf Basis dieser Grundlagen nur in grober Vereinfachung möglich. Aus diesem Grund wird auf Meßwerte zurückgegriffen [C5] (Bild C3). Dort wurde ein Beton der folgenden Zusammensetzung untersucht:

- w/z-Wert = 0,8,
- 270 kg Zement pro m^3 Beton (PZ 275),
- Größtkorn 15 mm (Sieblinie 1 nach Bild C3),

aus dem ein Prisma 10/15/60 cm in Stahlschalung betoniert wurde. Nach [C5] ergibt sich (Zitat):

"Erwartungsgemäß war unmittelbar unter der Betonoberfläche eine starke Anreicherung an Feinmörtel festzustellen. Alle ... Körner ... sind offenbar im Mittel um etwa die halbe Korngröße nach innen verschoben. Deshalb folgt auf den Mörtelbereich eine mit Zuschlägen angereicherte Zone, die von etwa 4 bis 20 mm Tiefe reicht ... und bei etwas mehr als 10 mm das Zuschlagmaximum erreicht. ... Erst in einem Abstand von etwa 20 bis 25 mm unter der Betonoberfläche beginnt im vorliegenden Fall der gleichmäßig aufgebaute Kernbeton."

2.2 Zusammenfassung und Auswirkungen auf die Porosität und Dichtigkeit

1. Für den schalungsnahen Bereich (ca. das 3 - 4-fache des mittleren Zuschlagdurchmessers; entspricht in etwa der Dicke der Betondeckung) ergibt sich mit d_m (mittlerer Korndurchmesser):

- Für den äußersten Betonbereich von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von $0,5 d_m$, hier 0 - 5 mm, gilt: Der Feinmörtelanteil fällt von 100 Vol.-% an der Betonoberfläche auf ein Minimum ab (ca. das 0,8 - 0,9-fache des mittleren Feinmörtelanteils). Dadurch entsteht eine äußere Zone der Betondeckung mit erhöhter Porosität.
 - Für den sich daran anschließenden Bereich der Tiefe $0,5 d_m$ bis ca. $3 d_m$ (ca. 5 - ca. 30 mm) gilt: Der Feinmörtelanteil steigt auf den Gehalt an, der i. M. der Betonzusammensetzung entspricht.
2. Die Zone der Betondeckung ist somit dadurch gekennzeichnet, daß in ihr der Übergang von einer geordneten, entlang der Schalung ausgerichteten Zuschlagverteilung, auf eine zufällige und regellose statistische Verteilung in Wandmitte erfolgt.
3. Aus dem Einfluß der Schalung auf die mengenmäßige Verteilung von Zuschlag und Feinmörtel ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:
- a) Auf Grund der inhomogenen Zusammensetzung des Betons der Betondeckung ergibt sich mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche zunächst eine Abnahme der Porosität, die erst nach durchlaufen eines Minimums auf die mittleren Verhältnisse ansteigt.
 - b) Die Dichtigkeit des Betons wird entsprechend in erster Näherung mit wachsender Tiefe zunehmen.
 - c) Der Einfluß der Schalung ist für Betonbauteile herstellungsbedingt und unvermeidlich gegeben (auch bei noch so sorgfältiger Auswahl der Sieblinie und intensiver Verdichtung).
 - d) Je kleiner der Größtkorndurchmesser, desto geringer ist der Schalungseinfluß, desto homogener ist die Betonzusammensetzung und umso dünner ist die oberflächennahe Zone der Feinmörtelanreicherung. (Für die Wände C und D sind somit im Vergleich zu den Wänden A und B, nur geringe herstellungsbedingte Unterschiede zwischen den untersuchten Wandtiefen zu erwarten).
 - e) Für die Wände A und B läßt sich folgende Abschätzung der Porositätsverhältnisse vornehmen: Herstellungsbedingt ist für die Betontiefe 0

- 10 mm eine ca. 1,2-fach größere Feinmörtelmenge und Porosität als in Wandmitte zu erwarten.

f) Gleichzeitig ist neben der im Mittel höheren Porosität der Betontiefe 0 - 10 mm in der Tiefe 2 - 5 mm eine Anreicherung von Zuschlägen der Größe 1 - 7 mm zu beobachten. Welchen Einfluß diese beiden Effekte zusammen auf die Porenstruktur und die Dichtigkeit des oberflächennahen Betons haben, wird die Versuchsauswertung zeigen.

3. PHYSIKALISCHE UND BETONTECHNOLOGISCHE ASPEKTE DES GAS- UND FLÜSSIGKEITS-TRANSPORTS IN BETONPOREN

3.1 Physikalische Gegebenheiten

Im stationären Zustand beruht der Transport von Fluiden durch den Porenraum auf der Annahme einer Proportionalität zwischen Transportursache (Konzentrationsgefälle bzw. Druckgefälle) und Transportleistung (Dichtestrom des transportierten Stoffes). Der Proportionalitätsfaktor ist die zu messende Baustoffeigenschaft. Die Transportgesetze wurden bereits im Teil B behandelt.

Transporte infolge Diffusion oder Kapillarität finden nicht in allen Betonporen statt, sondern nur in solchen, die eine bestimmte Mindestgröße aufweisen. Deren Anteile an der Gesamtporosität, sowie deren Form und Zusammenhang im Porensystem bestimmen die Transportleistung und die Zugänglichkeit des Betons für jene reaktiven Medien, die die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen können (Feuchteeinfluß siehe Abschn. 3.2).

Während Abschnitt 2 die Einflüsse der makroskopischen Betonzusammensetzung auf die Dichtigkeit von Beton durch Angabe der Verteilung von undurchlässigem Zuschlag und durchlässigem Zementstein aufzeigt, geht es hier um die Klärung der Bedeutung von Poren für die Dichtigkeit des Zementsteins.

Im weiteren wird aufgezeigt, welche grundlegenden theoretischen Beziehungen zwischen dem Porensystem (Porosität, Porenradienverteilung, Porenstruktur) und der Transportleistung besteht.

Die Ableitung dieser Zusammenhänge erfolgt an idealisierenden Porenmodellen, deren Dichtigkeit bestimmt wird (Berechnung theoretischer Werte der Transportkoeffizienten). Der Einfluß der Feuchte bleibt dabei unberücksichtigt.

3.1.1 Diffusion von Gasen in ideal geraden Poren

Diffusion ist ein gerichteter Strom von Gasmolekülen infolge eines Partialdruckgefälles der zu einem Konzentrationsausgleich führt. Der Vorgang hängt von den herrschenden physikalischen (Druck, Temperatur, Gaseigenschaften) und geometrischen Bedingungen (Größe des Transportraums, d.h. dem Porenradius) ab. Der Diffusionsvorgang entspricht bei Annahme gerader Porenkanäle, der Dicke der zu diffundierenden Feststoffschicht, bzw. bei nicht geradem Verlauf der Porenkanäle, deren gewundener Länge. In Bild C4 sind die erforderlichen Randbedingungen und Voraussetzungen angegeben.

Nicht betrachtet werden hier die Anteile des Diffusionsstroms, die durch Sorption an der inneren Oberfläche des Betons gebunden werden (physikalische Wechselwirkungen zwischen der Porenwandung und den Gasmolekülen), da sie nicht zum eigentlichen Transport beitragen. Nach [C6] gilt dies für Vorgänge in Poren von molekularer Dimension ($r < 1 \text{ nm}$). Aber auch in Poren mit den Abmessungen $1 \leq r \leq 25 \text{ nm}$ soll nach [C6] "ein zusätzlicher Transport an Porenwänden ... erst bei ... starker Absorption der Moleküle auf[treten] ...". Dieser Oberflächendiffusion wird ebenfalls nicht nachgegangen, da sie nur für hier nicht zu erwartende relativ große Gaskonzentrationen bedeutsam ist [C7]. Unabhängig davon ist auch die Transportleistung dieser Poren, in erster Näherung vernachlässigbar (Bereich der reinen Knudsen-Diffusion).

Physikalisch betrachtet, wird ein Diffusionsvorgang bestimmt durch die Vorgänge des Impulsaustausches bzw. der Impulsübertragung beim Zusammenstoß von zwei Molekülen der diffundierenden Gasart [C8]. Die Distanz, die zwei zusammenstoßende Moleküle i.M. bis zum nächsten Zusammenstoß zurücklegen, ist die mittlere freie Weglänge λ , die von den Eigenschaften des diffundierenden Gases (siehe Tab. C2) abhängt.

Erfolgt die Diffusion durch Poren in denen der mittlere Abstand Gasmolekül-Porenwand von gleicher Größenordnung oder kleiner als die mittlere freie Weglänge ist, so wird der Diffusionsvorgang wesentlich durch die Porenwand beeinträchtigt. Da die Wahrscheinlichkeit, daß ein Gasmolekül eher auf die Porenwand als auf ein zweites Gasmolekül trifft mit abnehmendem Porenradius wächst, gelten in diesen Poren nicht mehr die Gesetzmäßigkeiten der reinen Gasdiffusion. Es kommt zur sogenannten Knudsendiffusion. Die Grenze zwischen den beiden Diffusionsarten ist fließend, so daß sie sich nur durch die Definition eines Übergangsbereichs voneinander abgrenzen lassen. Nach [C8] gilt folgende Einteilung:

- $\lambda/2r \gg 1$: Knudsendiffusion bzw. Molekularbereich

Der Diffusionsvorgang wird durch die Stöße der Gasmoleküle mit der Porenwandung bestimmt. Maßgebend für die Beschreibung des Transportvorgangs ist das einzelne Gasmolekül. Der Diffusionskoeffizienten D_K lautet:

$$D_K = \frac{2 \cdot r}{3} \cdot \sqrt{\frac{8 R \cdot T}{\pi}} \cdot \epsilon_K \cdot 3600 \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (\text{C1})$$

mit:

r : Porenradius in [m]

R : spezielle Gaskonstante in [J/(kg · K)]

T : absolute Temperatur in [K]

ϵ_K : Größe der diffundierbaren Porosität des Molekularbereichs [-]

(Der Faktor 3600 ergibt sich aus der Umrechnung der Einheiten.)

- $\lambda/2r \ll 1$: Gasdiffusion bzw. Kontinuumsbereich

Der Diffusionsvorgang verläuft unabhängig von der Existenz der Porenwandung, da nur die gegenseitige Beeinflussung der Gasmoleküle untereinander Bedeutung für den Transportvorgang hat. Der Diffusionskoeffizienten D_G lautet:

$$D_G = \frac{3}{8 \cdot p \cdot d_{1,2}^2} \cdot \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{2 \pi m_1 \cdot m_2}} \cdot \sqrt{(k \cdot T)^3} \cdot \epsilon_G \cdot 3600 \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (\text{C2})$$

mit:

p : Luftdruck [N/m²]

$d_{1,2}$: effektiver Moleküldurchmesser; Mittelwert aus dem Moleküldurchmesser des diffundierenden und des zu diffundieren Gases [m]

(Zahlenwerte siehe Tab. C2)

$m_1; m_2$: atomare Massen der beiden am Diffusionsvorgang beteiligten Gase [kg] (Zahlenwerte siehe Tab. C2)

k : Boltzmann-Konstante, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/k

ε_G : Größe der diffundierbaren Porosität des Kontinuumsbereichs [-]

T : absolute Temperatur [K]

(Der Faktor 3600 ergibt sich aus der Umrechnung der Einheiten)

- $\lambda/2r \approx 1$: Übergangsbereich

Es kommt zu einer Überlagerung der beiden zuvor beschriebenen Diffusionsarten (Mischtransport) deren exakte physikalische Beschreibung nicht bekannt ist. Näherungsweise gilt:

$$\frac{1}{D_{\bar{U}}} = \frac{1}{D_K} + \frac{1}{D_G} \quad \text{bzw.} \quad D_{\bar{U}} = \frac{D_K \cdot D_G}{D_K + D_G} \quad (C3)$$

mit:

$D_{\bar{U}}$: Diffusionskoeffizient des Übergangsbereichs

Der Diffusionskoeffizient des Übergangsbereichs enthält als Grenzfälle jene der Gas- und Knudsen-Diffusion und ist somit als einziger geeignet das gesamte diffundierbare Porenradienspektrum der Betonporen zu erfassen. Alle weiteren Ableitungen werden deshalb nur für $D_{\bar{U}}$ durchgeführt.

Da die mittlere freie Weglänge eine druck- und temperaturabhängige Größe ist - sie wird umso größer, je höher die Temperatur und je niedriger der Druck ist - hängt die Abgrenzung der verschiedenen Diffusionsvorgänge sowie die Größe der Diffusionskoeffizienten von den jeweiligen Randbedingungen ab. An Hand dieser Gleichungen können nun die zuvor angestrebten Zusammenhänge abgeleitet werden.

3.1.1.1 Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Porosität und dem Porenradius

Aus den Gl. (C1 - C3) erkennt man die direkte Proportionalität zwischen Porosität und Diffusionkoeffizient. Zur Klärung des Zusammenhangs zwischen

Porenradius und Diffusionskoeffizient wird zunächst der Diffusionskoeffizient des Übergangsbereichs $D_{\bar{U}}$ durch Einsetzen von D_K und D_G angegeben:

$$D_{\bar{U}} = \frac{6 \cdot r \cdot \sqrt{8 R K^3 T^4} \cdot \sqrt{m_1 + m_2} \cdot 3600}{\sqrt{\pi} (16 r p d_{1,2}^2 \sqrt{16 R T m_1 m_2} + 9 \sqrt{(m_1 + m_2) (KT)^3})} \cdot \varepsilon_{\text{diff}} \quad (C4)$$

mit:

$\varepsilon_{\text{diff}}$: Größe der diffundierbaren Porosität [-]

Dabei zeigt sich, daß sich die Einflüsse

- Porenradius,
- äußere Randbedingungen und
- Gaseigenschaften

nicht voneinander trennen lassen. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge werden deshalb hier nur bestimmte Parameterkonstellationen betrachtet.

a) Porosität-Diffusionskoeffizient

Für definierte Bedingungen läßt sich Gl. (C4) folgendermaßen darstellen:

$$D_{\bar{U}} = K(r) \cdot \varepsilon_{\text{diff}} \quad (C5)$$

mit:

$K(r)$: Parameter der Diffusion der für definierte Bedingungen nur noch vom Porenradius r abhängig ist

Im folgenden wird das Produkt aus $K(r) \cdot \varepsilon_{\text{diff}}$ als Diffusionsprodukt bezeichnet werden.

Für: - $T = 293 \text{ K}$

- Diffusion von CO_2 durch Luft

- $p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$ bzw. 10^5 Pa

erhält man:

$$K(r) = \frac{r}{17,9362 \cdot r + 1,11016 \cdot 10^{-6}} \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (C6)$$

Bild C5 zeigt eine Auswertung von Gl.(C6). Deutlich wird der Einfluß der Knudsen-Diffusion. Trotz konstanter Porosität ist für Poren mit einem Radius $r \leq 10^{-7}$ m eine deutliche Verringerung des Diffusionskoeffizienten um mehrere Zehnerpotenzen festzustellen. Dagegen bleibt für $r > 10^{-7}$ m der Diffusionskoeffizient nahezu konstant.

b) Porenradius-Diffusionskoeffizient

Um den Einfluß des Porenradius zu verdeutlichen, ist in Bild C6 die Größe des Diffusionskoeffizienten über dem Porenradius aufgetragen (wiederum für das unter a) gewählte Beispiel). Für die Porosität wurde ein konstanter Wert von $\varepsilon_{\text{diff}} = 0,1 = 10 \text{ Vol.-%}$ angenommen. Zur Berücksichtigung von Witterungseinflüssen wurden folgende Fälle untersucht:

- Für die obere Hälfte des Bildes ist bei konstantem äußeren Druck von $p = 1 \text{ bar}$ die Temperatur zu

$$T_1 = 253 \text{ K} = -20 \text{ °C}$$

$$T_2 = 323 \text{ K} = +50 \text{ °C}$$

(Grenzfälle mitteleuropäischen Wetters)

variiert worden.

- Für die untere Hälfte des Bildes ist für eine konstante äußere Temperatur von $T = 293 \text{ K}$ der Luftdruck zu

$$p_1 = 1,1 \text{ bar}$$

$$p_2 = 0,9 \text{ bar}$$

variiert worden.

Dabei wurde der Einfluß der Temperatur und des Drucks auf die Gaseigenschaften nicht berücksichtigt.

Wie Bild C6 zeigt, sind sowohl der Temperatur- als auch der Druckeinfluß im Bereich der witterungsbedingten Schwankungen vernachlässigbar.

Außerdem wird durch Bild C6 die zuvor getroffene Annahme, daß Poren mit einem Radius von $r \leq 30 \text{ nm}$ eine wesentlich geringere und im Vergleich zu größeren Poren vernachlässigbare Transportleistung aufweisen, bestätigt.

Der Einfluß der Betonfeuchte läßt sich mit diesem Porenmodell nicht darstellen. Da nur die Poren mit $r \geq 30$ nm für Diffusionsvorgänge von Interesse sind, ist es weder so,

- daß Adsorbatwasserfilme eine zu berücksichtigende Verengung des Porenquerschnitts bewirken
- noch so, daß durch Kapillarkondensation diese Poren verschlossen würden (zur Füllung von Poren mit einem Radius von $r \geq 30$ nm wären rel. Feuchten von über 96 % erforderlich; siehe auch Abschn. 3.2).

Transportkoeffizienten realer Porensysteme sind wesentlich kleiner als die mit den hier getroffenen Idealisierungen berechneten Transportkoeffizienten. Die Berücksichtigung der bisher vernachlässigten Einflüsse der Porenstruktur durch eine ingenieurmäßige Näherung wird in Abschn. 3.2 angegeben. Eine Abschätzung des zu erwartenden Einflusses vereinfachter Strukturelemente kann den Angaben von [C11] entnommen werden.

3.1.1.2 Einfluß der Gasart

Zusätzlich ist von Interesse, inwiefern der Diffusionstransport durch die Eigenschaften des diffundierenden Gases bestimmt wird und ob zwischen der Diffusion verschiedener Gasarten Beziehungen bestehen, die es erlauben, die Diffusion einer Gasart durch die Diffusion einer anderen Gasart auszudrücken.

Bild C7 enthält für Wasserdampf, Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Helium die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vom Porenradius für $T = 293$ K, $p = 1$ bar und $\varepsilon_{\text{diff}} = 0,1 = 10$ Vol.-%. Die sich für diese Gasarten ergebenden Kurven verlaufen nahezu parallel zueinander (obere Hälfte von Bild C7).

Genaueren Aufschluß über die Verhältnisse zwischen den einzelnen Gasarten gibt die untere Hälfte von Bild C7. Demnach ergibt sich die größte Diffusionsdichtigkeit für Kohlendioxid. Im Vergleich dazu ist unabhängig vom Porendurchmesser für die Sauerstoffdiffusion ein um $1/6$ größerer Diffusionskoeffizient und für die Wasserdampfdiffusion ein um ca. $1/3$ größerer Diffusionskoeffizient zu berücksichtigen, wobei im Fall der Wasserdampfdiffusion

dieses Verhältnis nicht unabhängig vom Porendurchmesser ist. Inwiefern diese Aussagen durch Einflüsse der Struktur des Porensystems und der Feuchte beeinflusst werden, wurde hier nicht näher untersucht.

3.1.2 Kapillare Wasseraufnahme ideal geradern Poren

Der kapillare Wassertransport ist ein von mechanischen Kräften (Oberflächenspannung, Schwerkraft, Reibung) gesteuerter Vorgang. Eine darüberhin-
ausgehende Wechselwirkung mit der Porenwandung tritt nicht auf. Betrachtet man zunächst die einzelne Kapillare mit dem konstanten Radius r unter den Randbedingungen von Bild C8, so ergibt sich die Kapillarspannung p_k der gekrümmten Flüssigkeitsoberfläche zu [C8]:

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma_{1,2} \cdot \cos \vartheta}{r} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{C7})$$

mit:

$\sigma_{1,2}$: Oberflächenspannung der Flüssigkeit, hier destilliertes Wasser [N/m]

r : Radius der Pore [m]

ϑ : Benetzungswinkel [°], hier $\vartheta \approx 0^\circ$ angenommen

Befindet sich der Krümmungsmittelpunkt des Meniskus in der Gasphase, so handelt es sich um eine Zugspannung, die für den Wasseranstieg und die mechanische Bindung des Wassers im Baustoff entgegen der Wirkung der Schwerkraft verantwortlich ist.

Das Zeitgesetz des Wasseranstiegs lautet [C12]:

$$h(t_s) = \sqrt{\frac{\sigma_{1,2} \cdot \cos \vartheta}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{r} \cdot \sqrt{t_s} = k_1 \cdot \sqrt{r} \cdot \sqrt{t_s} \ll H = \frac{2 \sigma_{1,2} \cdot \cos \vartheta}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (\text{C8})$$

mit:

h : Steighöhe zur Zeit t_s in [m]

k_1 : phys. Konstante; siehe Bild C9 [$\sqrt{\text{m}}/\sqrt{\text{s}}$]

η : dynamische Viskosität der Flüssigkeit [Ns/m^2]

ρ_w : Dichte der Flüssigkeit [kg/m^3]

r : Porenradius in [m]

g : Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$

t_s : Zeit seit Versuchsbeginn [h]

H : max. Steighöhe [m].

Diese Gesetzmäßigkeit gilt nur, wenn

a) der Einfluß der Schwerkraft ausreichend klein ist, also zu jedem Zeitpunkt t_s gilt: $h(t_s)/H \ll 1$

und

b) der Kapillarzug des Meniskus nicht so groß wird, daß der Flüssigkeitsfaden abreißt.

Daraus ergeben sich Festlegungen über einzuhaltende Grenzwerte für den Porenradius. Es gilt nach [C13] bis [C16]:

$$100 \text{ nm} < r < 10 \text{ } \mu\text{m}.$$

Geht man nun von der Einzelkapillare zum Beton über, so ergeben sich die Kennwerte des kapillaren Wassertransports zu:

a) Wasseraufnahmekoeffizient A [$\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$]

$$\begin{aligned} A &= g_w / \sqrt{t_s} = \rho_w \cdot h(t_s) \cdot \pi r^2 / (F \cdot \sqrt{t_s}) \\ &= \rho_w \cdot k_1 \cdot \sqrt{r} \cdot \varepsilon_{\text{abs}} = k_2 \cdot \sqrt{r} \cdot \varepsilon_{\text{abs}} \end{aligned} \quad (\text{C9})$$

b) Wassereindringkoeffizient [m/\sqrt{h}]

$$B = h / \sqrt{t_s} = k_1 \cdot \sqrt{r} \quad (\text{C10})$$

c) ISA-Wert [$\text{ml/m}^2 \cdot \text{s}$]

$$\text{ISA} = \frac{dg_w}{\rho_w \cdot dt_s} = \frac{A}{2 \cdot \rho_w \cdot \sqrt{t_s}} = \frac{k_2 \cdot \sqrt{r} \cdot \varepsilon_{\text{abs}}}{2 \cdot \rho_w \cdot \sqrt{t_s}} \quad (\text{C11})$$

Für die Saugzeit $t_s = 10 \text{ min}$ und unter Berücksichtigung der Umrechnung der Einheiten des Wasseraufnahmekoeffizienten in die des ISA-Wertes wird daraus:

$$ISA_{10} = \frac{277,8 \cdot k_2}{2 \cdot \rho_w \cdot \sqrt{10/60}} \cdot \sqrt{r} \cdot \varepsilon_{abs} = k_3 \cdot \sqrt{r} \cdot \varepsilon_{abs} \quad (C12)$$

Die Oberflächenspannung und die dynamische Viskosität des Wassers sind temperaturabhängig. Dies ist für die Konstanten k_1 bis k_3 zu berücksichtigen. Analog zur Diffusion können auch die Koeffizienten des kapillaren Wassertransports in Abhängigkeit von

- der Porosität
- und dem Porenradius

abgeleitet werden.

3.1.2.1 Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA-Wertes von der Porosität und dem Porenradius

Die zuvor abgeleiteten Gleichungen zeigen, daß die Kennwerte proportional der Porosität und der Wurzel des Porenradius sind. Dies ist für die 3 Temperaturen $T_1 = 273 \text{ K}$, $T_2 = 293 \text{ K}$ und $T_3 = 323 \text{ K}$ in den Bildern C10 und C11 dargestellt. Wie für den Diffusionsvorgang, ist auch hier der Temperatureinfluß gering. Auf Grund der Ableitungen muß er für den ISA-Wert halb so groß sein wie für den Wasseraufnahmekoeffizienten. Im folgenden wird die Größe $\sqrt{r} \cdot \varepsilon_{abs}$ als Absorptionsprodukt $P(r)$ bezeichnet.

3.1.2.2 Vergleich des Diffusions- und Absorptionsverhaltens

Sowohl die Diffusion als auch die kapillare Wasseraufnahme (Absorption) können auf spezifische Radienbereiche und deren Porenvolumen (ε_{diff} bzw. ε_{abs}) eingegrenzt werden. Außerdem wurde eine je Transportart eigentümliche Abhängigkeit vom Porenradius r_{diff} bzw. r_{abs} festgestellt. Für Beton bzw. Zementstein ist zu erwarten, daß, auch wenn ein breites Porenradienspektrum vorhanden ist, im Laufe der Hydratation und durch die Witterungsbeanspruchung nicht beliebige voneinander unabhängige Werte für diese Größen entstehen können. Daraus erhebt sich die Frage, inwieweit zwischen Diffusion und kapillarer Wasseraufnahme, wenn schon nicht physikalisch begründete, so doch empirisch abgesicherte, verallgemeinerbare Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Transportleistungen bestehen.

Für idealisierte Porensysteme sowie für $T = 293 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$, wird im folgenden die stationäre CO_2 -Diffusionsleistung durch eine $d = 0,1 \text{ m}$ dicke Betonschicht, mit der absorbierten Wassermenge für $t_s = 10 \text{ Minuten}$ (ISA_{10} -Wert) verglichen. Bei diesem Vergleich werden Einflüsse der realen Porenstruktur und der Feuchte vernachlässigt.

Das Verhältnis von ISA_{10} zu diffundierter CO_2 -Menge g_{CO_2} ergibt sich mit Hilfe von Gl. (C12), dem 1. Fick'schen Gesetz und D_{CO_2} nach Gl. (C4), zu:

$$\frac{\text{ISA}_{10}}{g_{\text{CO}_2}} = \frac{1225 \sqrt{r_{\text{abs}}} (17,994 \cdot r_{\text{diff}} + 1,1102 \cdot 10^{-6})}{0,000054 \cdot r_{\text{diff}}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{abs}}}{\varepsilon_{\text{diff}}} \quad (\text{C13})$$

Tab. C3 zeigt die Ergebnisse der Auswertung von Gl.(13) für verschiedene Annahmen über die Größe von r_{diff} und dem Verhältnis $r_{\text{abs}}/r_{\text{diff}}$. Da der Wert $\text{ISA}_{10}/g_{\text{CO}_2}$ proportional zum Verhältnis $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}}$ ist, wurde mit $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}} = 1,0$ gerechnet. Realistische Werte für $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}}$ liegen im Bereich

$$0,2 \leq \varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}} \leq 0,8.$$

Für diesen Wertebereich zeigt Bild C12 die graphische Darstellung der Ergebnisse von Tab. C3. Folgende Schlußfolgerungen lassen sich daraus ableiten.

1. Für konstante Verhältnisses $r_{\text{abs}}/r_{\text{diff}}$ und $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}}$ ist der jeweils transportrelevante Radius von vernachlässigbaren Einfluß.
2. Die Ergebnisse zeigen, daß nur unter bestimmten Bedingungen eine Abhängigkeit zwischen Diffusions- und Absorptionsvorgängen zu erwarten ist, nämlich dann, wenn die Verhältnisse $r_{\text{abs}}/r_{\text{diff}}$ und $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}}$ zumindest näherungsweise unabhängig vom Einfluß betontechnologischer Parameter sind. Wie die Ausführungen im Abschn. C/6 sowie die Auswertung der Versuchsergebnisse im Berichtsteil D zeigen werden, ist dies der Fall (siehe auch die Veröffentlichung vorläufiger Auswertungen in [C18] und [C19]).
3. Weiterhin ist anzunehmen, daß zu einem bestimmten Verhältnis $\varepsilon_{\text{abs}}/\varepsilon_{\text{diff}}$ nicht jedes beliebige Verhältnis $r_{\text{abs}}/r_{\text{diff}}$ vorliegen kann, so daß die

hier ermittelte große Schwankungsbreite der Werte sich weiter einschränken wird.

3.2 Betontechnologische und baupraktische Parameter

Das Porensystem wird von betontechnologischen und anderen Parametern bestimmt. Außerdem ist im realen Bauteil ein Teil des Porenraums durch Feuchte unterschiedlicher Herkunft gefüllt. Dieser Teil ist für eine Gasdiffusion bzw. kapillare Wasseraufnahme nicht zugänglich. Die Dichtigkeit des Bauwerkbetons ergibt sich somit aus den beiden Anteilen

- a) Dichtigkeit infolge Betonqualität,
- b) Dichtigkeit infolge des Feuchtegehalts.

3.2.1 Dichtigkeit infolge Betonqualität

Bereits im Abschn. 3.1 wurde darauf hingewiesen, daß die Vernachlässigung der Einflüsse der Porenstruktur, nicht zu einer Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten der Transportkoeffizienten führt. Deshalb wird für die weitere Auswertung durch Bildung des Verhältnisses berechneter zu gemessener Transportkoeffizient eine empirische Bestimmung des Einflusses der Porenstruktur vorgenommen. Der so bestimmte Porenstrukturfaktor a_t bildet zusammen mit den bisherigen Ableitungen die Grundlage zur Beschreibung des Zusammenhangs Porosität und Dichtigkeit, und der Beziehung zwischen Diffusion und Absorption.

Diese Erweiterung des bisherigen idealisierten Porenmodells auf realistische Porengeometrien ist in Bild C13 veranschaulicht. Durch diese Skizze soll natürlich nicht nahegelegt werden, wirkliche Porenkanäle hätten die im Bild C13 dargestellte Form und würden vor allem nur zweidimensional in einer Ebene verlaufen. Die Skizze soll lediglich auf die vom idealisierten Porenmodell vernachlässigten Gegebenheiten hinweisen.

Auch für den Porenstrukturfaktor a_t sind transportspezifische Unterschiede zu berücksichtigen. Diese beruhen auf physikalischen Gründen: den unterschiedlichen transportrelevanten Radienbereichen, einer transportartbedingten Radienabhängigkeit und dem Umstand der Unterbrechung transportwirksamer

Poren durch nicht wirksame Poren, der für beide Transportarten in unterschiedlichen Umfang gegeben ist.

Nur eine solcherart vereinfachende und summarische Erfassung mehrerer Teileinflüsse, die auch nicht wirklichkeitsnahe Annahmen der Versuchsauswertung mit korrigiert, ist im Rahmen dieses Vorhabens möglich. Prinzipiell sind dennoch alle Einflüsse des Porensystems auf die Dichtigkeit getrockneten Betons berücksichtigt.

3.2.2 Dichtigkeit infolge des Feuchtegehaltes

Der Einfluß der Feuchte auf die Betondichtigkeit wird durch die bisherigen Ausführungen nicht erfaßt. Aus [C13,C20] ist der theoretische Zusammenhang zwischen Porosität bzw. Porenradius und Feuchtegehalt bekannt. Dabei sind folgende physikalische Zusammenhänge zu berücksichtigen [C21]:

- Poren mit einem Radius $r > 100 \text{ nm}$

Das in diesen Poren lagernde Wasser (bulk-water) unterliegt weder adsorbierenden Oberflächenkräften noch Vorgängen der Kapillarkondensation. Es handelt sich um freies Wasser das mechanisch über die Kapillarität gebunden ist. Dazu ist es allerdings nötig, daß entweder der Taupunkt unterschritten wird, oder der Beton in direktem Kontakt mit Wasser steht.

- Poren mit einem Radius $10 \text{ nm} \leq r \leq 100 \text{ nm}$

In diesem Porenradienbereich lagert kapillarkondensiertes Wasser außerhalb der Reichweite von Oberflächenkräften (Kondensation von Wasser im Feuchtigkeitsbereich von 90 - 99 % r.F. auf Grund des geringeren Sättigungsdampfdrucks über dem gekrümmten Meniskus).

- Poren mit einem Radius $r < 10 \text{ nm}$

Wasserfilme die an Porenwandungen gebunden sind und die sich innerhalb der Reichweite von Oberflächenkräften befinden. Innerhalb dieser Reichweite von ca. 10 nm ist zwischen $\approx 2,5$ Monoschichten Wasser die direkt auf der Porenoberfläche fest gebunden sind und dem strukturierten Wasser der weiter entfernt liegenden Schichten zu unterscheiden. Alle so gebundenen Wassermoleküle besitzen nur eine geringe Beweglichkeit senkrecht zur Oberfläche.

In Bild C14 sind diese Verhältnisse schematisch skizziert. Im hygroskopischen Bereich ergibt sich der Zusammenhang zwischen rel. Feuchte und Porenradius auf Grund der Kelvin-Gleichung. Porositätsuntersuchungen an feuchten Proben mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestätigen diese Zusammenhänge. Versuchsergebnisse, entnommen aus [C22], sind in Bild C15 wiedergegeben. Bei dem untersuchten Material handelt es sich um einen Mörtel mit einem w/z-Wert von 0,5 und einem HOZ 350 L (65 % Hüttensandanteil) als Bindemittel. Die Proben entstammen der Mitte eines 25 cm dicken Versuchskörpers, der nach 7 Tagen Wasserlagerung 6 Jahre dem angegebenen Klima von 60 % bzw. 80 % r.F. ausgesetzt wurde. Auf Grund der besseren Hydratationsbedingungen weist der im Klima von 80 % r.F. gelagerte Versuchskörper eine geringere Porosität auf.

Nur bei trockenen Proben entspricht der ermittelte Radius dem Porenradius. Für feuchte Proben ist der ermittelte Radius der Radius des verbleibenden Leerraumes zwischen den auf den Porenwänden gespeicherten Wasserschichten. Ermittelt man aus dem Diagramm zunächst die Porosität für Poren mit einem derart reduzierten Radius von $r > 100 \text{ nm}$, so hat der Feuchtegehalt darauf keinen Einfluß. Es ergibt sich unabhängig vom Feuchtegehalt eine Porosität von ca. 1 - 2 Vol.-%.

Dagegen verringert sich die Porosität der Poren $r > 30 \text{ nm}$ bei den bei 60 % r.F. gelagerten Proben von 5,8 Vol.-% im getrockneten Zustand, auf 5,3 Vol.-% im Zustand der zugehörigen Ausgleichsfeuchte und bei den bei 80 % r.F. gelagerten Proben von 5,0 Vol.-% auf 1,25 Vol.-%. Diese Abnahme der diffundierbaren Porosität infolge Feuchtespeicherung steht in Einklang mit Messungen des O_2 - bzw. WD-Diffusionskoeffizienten [C23,C24] an feuchten Proben. Während sich die Diffusionskoeffizienten von getrockneten und bei 60 % r.F. gelagerten Proben nur geringfügig unterscheiden, ist der Diffusionskoeffizient von bei 80 % r.F. und mehr gelagerten, aber ansonsten identischen Proben deutlich geringer.

Ohne dies im Rahmen dieses Forschungsvorhabens näher zu untersuchen, ist es möglich, daß entwickelte Diffusionsmodell - wonach die Diffusion von Poren des Radius $r > 30 \text{ nm}$ bestimmt wird - nicht nur auf getrocknete Betone, sondern auch auf feuchte Bauwerksbetone anwenden zu können. Da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine entsprechenden Versuche vorgesehen waren,

bleibt die Verifikation dieser Annahme zukünftiger Forschung überlassen. (Das hier entwickelte Modell wurde nur für die Verhältnisse trockener Betone abgeleitet und dient i.w. auch nur der Erklärung solcher Gegebenheiten).

Außerdem zeigen diese Ergebnisse, daß die unterschiedlich feuchten Lagerungsbedingungen unterschiedlich große Porositäten und Porenradienverteilungen ergeben. Ein wesentlicher Gesichtspunkt der Diskussion der Versuchsergebnisse wird es deshalb sein, den Einfluß der Freilandlagerung und der Laborlagerung gegeneinander abzugrenzen (Klärung der Bedeutung lagerungsartabhängiger Hydratations- und Karbonatisierungsbedingungen).

4. AUSWERTUNG VON PORENRADIENVERTEILUNGEN: METHODEN UND ZIELE

4.1 Ziele der Auswertung

Die Auswertung der mittels Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Porenradienverteilungen $\epsilon(r)$ dient folgenden Zielen:

- 1) Ermittlung solcher Kennwerte (Fraktilradien, siehe Abschn. 4.2), die anstelle einer analytischen Beschreibung des Funktionsverlaufs der Porenradienverteilung, deren quantitative Beschreibung ermöglichen. Mit ihnen ist die Beurteilung der Betonqualität (Größe der Porosität, Ablauf und Zustand der Hydratation und Karbonatisierung) vorgesehen.
- 2) Ermittlung transportrelevanter Teilporositäten und der zugehöriger hydraulischen Porenradien (Quantifizierung des Porenmodells). Dies dient der Beurteilung der Dauerhaftigkeit, ist Grundlage der Korrelation von Porosität und Dichtigkeit und Voraussetzung für die Ableitung bezüglich der Ersetzbarkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten durch den ISA-Wert.

Außerdem ermöglicht diese Auswertung die Berechnung des theoretischen Transportkoeffizienten und des Porenstrukturfaktors nach Abschn. 3.2.2.

- 3) Der Ermittlung des Verteilungstyps der Porenradien, als ergänzende Information bzw. Alternative zu Pkt. 1) (Ersatz der analytischen durch

eine statistische Beschreibung der Porenradienverteilung mit demselben Ziel wie Pkt. 1)).

4.2 Methoden der Auswertung von Porenradienverteilungen

Methoden die auf solche Kennwerte führen sind nicht bekannt, können aber in Anlehnung an Verfahren zur beurteilenden Beschreibung von Sieblinien und Häufigkeitsverteilungen entwickelt werden.

Dazu wird angenommen, daß Porenradienverteilungen auch so ausgelegt werden können, daß sie angeben mit welcher Häufigkeit

- a) Poren größer eines Radiuses r auftreten (integrale Radienverteilung)
- b) Poren eines jeden Radiuses r auftreten (differentielle Radienverteilung)

Deutet man den Begriff Häufigkeit als Wahrscheinlichkeit, so können neben betontechnologisch-physikalischen, vor allem statistische Auswertungen angewendet, sowie Auswertungen die beide Aspekte berücksichtigen, abgeleitet werden.

4.2.1 Statistische Methoden

Für die statistisch Auswertung der differentiellen Radienverteilung ergeben sich zwei Möglichkeiten:

- a) Es wird keine Annahme über die Art des vorliegenden Typs der Radienverteilung getroffen.

Über die Ermittlung von Flächenmomenten lassen sich die statistischen Merkmale einer Verteilung berechnen [C25]. Dieses Vorgehen eignet sich in erster Linie für monodisperse Systeme, es wird deshalb hier nicht weiter verfolgt.

- b) Die Radienverteilung ist durch eine bzw. durch eine Überlagerung mehrerer Standardverteilungen beschreibbar.

Im Beton entstehen folgende Porenarten: Luftporen, Verbundporen, Kapillarporen und Gelporen. Poren- oder Partikelgrößen sind meist als log.

normalverteilt einzustufen [C26]. Somit kann die Porenradienverteilung von Beton als Überlagerung der je für sich log. normalverteilten Porenarten angesehen werden. Eine Trennung der Einzelanteile voneinander kann mit Hilfe des Schlusses von einer gestutzten Normalverteilung auf die Gesamtverteilung vorgenommen werden [C27]. Ein hier nicht wiedergegebenes Auswerteverfahren konnte entwickelt werden. Mit ihm gelang die Bestätigung der oben getroffenen Annahme bezüglich des Verteilungstyps.

Die statistische Auswertung der integralen Porenradienverteilung besteht in der Angabe von Fraktilwerten der Porenradienverteilung. Dies sind diejenigen Porenradien, die von festgelegten Prozentsätzen der Porosität über- bzw. unterschritten werden (siehe Abschnitt 4.3).

4.2.2 Physikalische und empirische Methoden

Nichtstatistische Verfahren benutzen entweder die Transporteigenschaften der Poren oder beruhen auf rein empirischen Überlegungen. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen differentieller und integraler Radienverteilung nicht mehr sinnvoll. Die durchgeführten Auswertungen beschränken sich im folgenden auf die integrale Radienverteilung.

Die Auswertung nach phys. Gesichtspunkten besteht in der Bestimmung transportrelevanter Teilporositäten und deren zugehörige hydraulische Radien. (Diese, sowie deren Verhältnisswerte und Differenzen sind zu betrachten; vergleiche Abschnitt 3). Empirische Kennwerte ergeben sich z.B. durch analoges Vorgehen wie bei der Bestimmung der Körnungsziffer aus Sieblinien oder durch Berechnung der Porenvolumensumme nach Schönlin [C4]. Empirische Kennwerte werden hier nicht untersucht.

4.2.3 Aussagekraft der Kennwerte

Die physikalischen Kennwerte ergeben den direkten Bezug zwischen Porensystem und Dauerhaftigkeit. Von ihnen wird deshalb eine große Aussagekraft erwartet.

Die statistischen Kennwerte dienen der Beschreibung der Betonqualität. Sie sind geeignet Veränderung der Porenradienverteilung den jeweiligen Hydrata-

tions- und Karbonatisierungsbedingungen zuzuschreiben. Über diesen beschreibenden Charakter hinaus, haben sie keine Bedeutung. Dies liegt daran, daß der mit dem Porosimeter erfaßbare Bereich der Porenradien nur einen Teilbereich des gesamten Porenspektrums des Betons umfaßt. Die Auswahl des erfaßbaren Porenbereichs hängt nur von gerätespezifischen Größen ab (Maximal- und Minimaldruck) und ist somit willkürlich in Bezug auf physikalisch-chemische Gesichtspunkte des Verlaufs der Hydratation und Karbonatisierung.

Kennwerte die daß gesamte erfaßte Porenspektrum beinhalten, also im einfachsten Fall ϵ_{Hg} , aber auch die hier benutzten Fraktilradien, sind somit nur von begrenztem Nutzen, da alle Porositätsveränderungen außerhalb des Meßbereichs des Porosimeters unbekannt und unberücksichtigt bleiben. Darüberhinaus ist zu beachten, daß statistische Kennwerte nicht unmittelbar auch physikalisch oder betontechnologisch sinnvoll sind.

Da die Messung der Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie nur auf eine Porenradienverteilung führt die Modellcharakter für die wirkliche Porengrößenverteilung hat (siehe Abschnitt B), die Form der differentiellen Porenradienverteilung von dem benutzten Rechenverfahren abhängt und die Probenvorbereitung (Art der Trocknung) entscheidenden Einfluß auf das Meßergebnis ausüben [C28], sind Verfahren zur Auswertung von Porenradienverteilungen a priori in ihrer Aussagekraft auf den durch diese Einflüsse abgesteckten Rahmen begrenzt und kritisch zu bewerten.

4.3 Bestimmung von Fraktilradien

Die Porosität ϵ_{Hg} von Betonproben ist durch das Verhältnis Zuschlag- zu Zementsteinanteil bestimmt, das nur nach Augenschein bekannt ist.

Angestrebt wird ein für den untersuchten Beton repräsentatives Verhältnis (siehe Abschnitt B). Nur solche Proben wurden hier untersucht.

Aus Vorversuchen erwies sich die Lage der relativen Radienmaxima als unabhängig von der Größe der Porosität, und somit auch unabhängig von Zuschlag- zu Zementsteinverhältnis. Durch Bezug der Summenporosität zu einem beliebigen Radius r auf die gemessene Gesamtporosität, erhält man eine Form der integralen Radienverteilung, die unabhängig von der Größe der Porosität und somit auch unabhängig von der Größe des unbekannten Verhältnisses Zuschlag

zu Zementstein ist. Aus dieser Darstellung der relativen Porenradienverteilung werden die Fraktilwerte abgelesen.

Neben dem Median $r_{0,5}$ als 0,5-Quantil - auch als Zentralwert bezeichnet - werden die Viertel- und Zehntelwerte bestimmt:

$r_{0,10}$: Radius der von 10 % des Porenvolumens unterschritten wird

$r_{0,25}$: Radius der von 25 % des Porenvolumens unterschritten wird

$r_{0,75}$: Radius der von 75 % des Porenvolumens unterschritten wird

$r_{0,90}$: Radius der von 90 % des Porenvolumens unterschritten wird

Der Radius r_q ist somit derjenige Radius r , der mit der Wahrscheinlichkeit q unterschritten bzw. mit der Wahrscheinlichkeit $1 - q$ überschritten wird (siehe Bild C16).

Die einzelnen Quantilwerte r_{q_i} können außerdem zu einem gewogenen mittleren Radius r_g zusammengefaßt werden. Dabei wird entsprechend der Darstellung von Bild C17 die Wichtung über die Prozentanteile q_i vorgenommen.

Die Einzelanteile zu r_g und Wichtungsfaktoren ergeben sich zu ($n = 4$):

$$i = 1 \quad \Delta \log r_{g1} = \left(0,10 + \frac{q_{i+1} - q_i}{2}\right) \cdot \log r_1 \quad (C14)$$

$$2 \leq i \leq n - 1 \quad \Delta \log r_{gi} = \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{2} \cdot \log r_i \quad (C15)$$

$$i = n \quad \Delta \log r_{gn} = \left(0,10 + \frac{q_i - q_{i-1}}{2}\right) \cdot \log r_n \quad (C16)$$

$$\log r_g = \sum_{i=1}^n \Delta \log r_{gi} \quad (C17)$$

Für alle Auswertungen ist darauf zu achten, daß ihnen auch tatsächlich der gesamte Meßbereich von $r_{\min} = 3,75 \text{ nm}$ bis $r_{\max} = 7500 \text{ nm}$ zugrundeliegt. Bei Porosimetern, die in einem anderen Druckbereich arbeiten, lassen sich zwar auch diese Kennwerte berechnen, die dabei erzielten Ergebnisse sind aber nicht mit den hier ermittelten Werten für die Fraktilradien vergleichbar.

4.4 Auswertung nach physikalischen Gesichtspunkten

Neben der betontechnologischen Aufteilung der Betonporen mit der Hauptunterscheidung zwischen Gel- und Kapillarporen erfolgt hier die Abgrenzung transportrelevanter Teilporositäten. Aus der Kapillarporosität ε_{cap} können die kapillar wirksame und diffusionswirksame Teilporositäten ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ abgegrenzt werden.

Nach Abschn. 3 ist ein kapillarer Wassertransport nur in Poren des Radienbereichs

$$100 \text{ nm} \leq r \leq 10 \text{ } \mu\text{m}$$

möglich. Die kapillar wirksame Porosität ε_{abs} wird somit von den Poren dieses Radienbereichs gebildet.

Eine nennenswerte Diffusion erfolgt in Poren mit $r \geq 25 \text{ nm}$. Ein oberer Grenzradius existiert nicht. Somit wird die diffusionswirksame Porosität $\varepsilon_{\text{diff}}$ von den Poren dieses Radienbereichs gebildet.

Da dieser Grenzradius ungefähr mit dem der Kapillarporosität übereinstimmt, kann näherungsweise die diffundierbare Porosität der Kapillarporosität gleichgesetzt werden:

$$\varepsilon_{\text{diff}} \approx \varepsilon_{\text{cap}}$$

Für Beton ohne künstliche Luftporen können die Teilporositäten ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ aus Porenradienverteilungen abgelesen werden, da die Porositätsanteile für Poren größer $7,5 \text{ } \mu\text{m}$ (meßtechnisch bedingter oberer Grenzradius) vernachlässigbar sind (siehe Bild C18). Für die Transportvorgänge Diffusion und Absorption ist außerdem ihre Abhängigkeit vom Porenradius zu beachten. Als charakteristischer Wert für den Porenradius wird hier der hydraulische Radius dieser Teilporositäten bestimmt:

$$r_{\text{h,abs}} = \frac{\text{kapillarwirksame Porosität}}{\text{Oberfläche der kapillar wirksamen Poren}} = \frac{\varepsilon_{\text{abs}}}{0_{\text{abs}}} \quad (\text{C18})$$

$$r_{\text{h,diff}} = \frac{\text{diffusionswirksame Porosität}}{\text{Oberfläche der diffusionswirksamen Poren}} = \frac{\varepsilon_{\text{diff}}}{0_{\text{diff}}} \quad (\text{C19})$$

Der Zusammenhang zwischen den transportrelevanten Kennwerten einer Porenradienverteilung, dem in Abschn. 3 benutzten Porenmodell und den daraus abgeleiteten theoretischen Werten für die Transportkoeffizienten, ist mit der Umrechnung des hydraulischen Radius r_h in den äquivalenten Radius einer Zylinderkapillare, $r = 2r_h$, wie folgt gegeben:

$$D_{CO_2} = K(r_{h,diff}) \cdot \frac{\varepsilon_{diff}}{a_{t,diff}} \quad (C20)$$

$$A = k_2 \cdot \sqrt{2r_{h,abs}} \cdot \frac{\varepsilon_{abs}}{a_{t,abs}} \quad (C21)$$

$$B = k_1 \cdot \sqrt{2r_{h,abs}} / a_{t,abs} \quad (C22)$$

$$ISA_{10} = k_3 \cdot \sqrt{2r_{h,abs}} \cdot \frac{\varepsilon_{abs}}{a_{t,abs}} \quad (C23)$$

5. EINFLUSS VON HYDRATATION UND KARBONATISIERUNG AUF DAS PORENSYSTEM

5.1 Hydratationseinflüsse

Die Hydratation von Zementpasten ist mit der Bildung von Poren folgender Art verbunden:

1. Gel- und Schrumpfporen

Sie sind Bestandteil der CSH-Phasen. Während die Gelteilchen eine Größe von weniger als $1 \mu m$ bis zu einigen μm haben, und die engste Stelle zwischen zwei Zuschlägen $\geq 100 \mu m$ beträgt [C3], haben die Gelporen selbst einen Radius $r \leq 10 - 30 \text{ nm}$ [C32,C33]. Die Gelporosität wird somit von der Quecksilberdruckporosimetrie nur teilweise erfaßt.

Die Gelporosität wird nur vom Hydratationsgrad, nicht dagegen vom w/z-Wert beeinflusst [C34]. Mit zunehmender Hydratation erhöht sich das Volumen der Gelporen, wobei nicht bekannt ist, welche Auswirkungen dies auf die radienmäßige Verteilung der Poren hat. Für unterschiedliche Zementarten ergeben sich je typische Gelporositäten, je nach Art und Anteil der Zusätze.

Gelporen leisten auf Grund ihrer Größe keinen nennenswerten Eigenanteil zum Transportstrom, da der größte Teil der in sie eindringenden Stoffe durch Physio- bzw. Chemosorption gebunden wird.

2. Kapillarporen

Derjenige Überschußanteil am Anmachwasser, der nicht chemisch gebunden werden kann, hinterläßt im erhärteten Zementstein die Kapillarporen. Die Größe der Kapillarporosität ist somit vom w/z-Wert und der Zementleimmenge abhängig. Bei zunehmender Hydratation wachsen die neu gebildeten Hydratationsprodukte in diese Poren hinein, so daß die Kapillarporosität abnimmt. In den Kapillarporen, also auf der Oberfläche der CSH-Phasen lagert sich ein Teil des Ca(OH)_2 ab [C34]. Neben der Hydratation wird somit auch die Karbonatisierung die Kapillarporosität verringern. Kapillarporen haben einen Radius von $r \geq 30 \text{ nm}$. Nur im Fall direkter Wasserbeaufschlagung und bei Feuchteverhältnissen nahe an 100 % rel. Feuchte kommt es zu einer vollständigen Wasserfüllung dieser Poren. Somit sind für mittlere Witterungsverhältnisse Kapillarporen zugänglich. Einflüsse der Witterung werden sich somit in erster Linie in den Kapillarporen und Poren der Verbundzone Zuschlag-Zementstein widerspiegeln.

3. Verdichtungs- und (künstliche) Luftporen

Da hier nur Betone ohne künstliche Luftporen und vollständig verdichtete Betone untersucht wurden, ist der Anteil dieser Poren vernachlässigbar.

4. Verbundporen

Ein Modell über die Verhältnisse in der unmittelbaren Übergangszone von Zuschlag zu Zementstein wird in [C35] gegeben (siehe Bild C19). Ohne auf Einzelheiten einzugehen, stellt die Verbundzone auf Grund der relativ großen Porenradien, der erhöhten Porosität und der Ca(OH)_2 -Anreicherung eine Schwachstelle dar.

Somit ist für den Zementsteinbereich des Betons neben der eigentlichen Kapillarporosität ein zweites Porensystem, bestehend aus den Verbundporen zu berücksichtigen. Beide Porenteilsysteme sind miteinander verbunden und gehen fließend ineinander über, zeigen aber dennoch ein signifikant verschiedenes physikalisches Verhalten ([C35; C36]). In [C37] konnte eine Zunahme dieser Porosität mit wachsenden Betonalter nur dann festgestellt werden, wenn dem untersuchten Mörteln Flugasche zugegeben worden war.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit ist somit die Verbundporosität besonders zu beachten. Auf Grund der Porengröße und Ca(OH)_2 -Anreicherung wird sich ein nennenswerter Teil von Transport- und Karbonatisierungsvorgängen in diesen Poren abspielen (siehe Abschn. 5.2).

5.2 Karbonatisierungseinflüsse

Bei Betrachtung des Einflusses der Karbonatisierung auf die Porosität und die Porenradienverteilung ist das unterschiedliche Karbonatisierungsverhalten der verschiedenen Hydratationsprodukte zu beachten:

1. Karbonatisierung des Ca(OH)_2

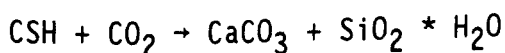
Es erfolgt ein vollständiger Umsatz des gesamten in Lösung gehbaren Ca(OH)_2 zu CaCO_3 . Gegenüber dem Ca(OH)_2 hat das CaCO_3 ein um 11 Vol.-% größeres Volumen. Die Menge an gebildeten Ca(OH)_2 ist abhängig von der Zementart und dem Hydratationsgrad.

Für Portlandzement ist die Karbonatisierung des Ca(OH)_2 mit einer Reduktion des Porenvolumens verbunden. Dies betrifft bei reinen Zementsteinpasten die eigentlichen Kapillarporen. Nach [C38] ist für Poren im Bereich 20 - 100 nm eine deutliche Verringerung der Porosität festzustellen, nach [C39] verringert sich insbesondere die Porosität im Radienbereich von 10 - 40 nm, während neue Poren mit $r < 10$ nm hinzukommen.

Für Mörtelproben ist nach [C34] dagegen mit einem Abbau der Verbundporosität zu rechnen. Poren im Bereich 100 - 10.000 nm gehen danach in ihrem Volumen auf die Hälfte zurück (Mörtel mit w/z-Werten von 0,5 und 0,6).

2. Karbonatisierung der CSH-Phasen

Die Karbonatisierung von CSH ist eine topochemische Reaktion, wobei das in die CSH-Phasen eingebaute CaO durch CO_2 unter Karbonatbildung herausgelöst wird, und amorphe Kieselsäure als weiteres Reaktionsprodukt zurückbleibt:



Amorphe Kieselsäure ist ein poröses Gel mit bimodaler Porenradienverteilung. Radienmaxima liegen bei 5 nm und 200 - 400 nm [C34].

Auf das Karbonatisierungsverhalten der übrigen Zementhydratationsprodukte wird hier nicht weiter eingegangen.

5.3 Abschätzung des Hydratationsverlaufs von PZ-Betonen

Für Portlandzement ergibt sich die in den Bildern C20 und C21 dargestellte zeitliche Entwicklung des Hydratationsverlaufs. Die Erhärtingsbedingungen haben folgenden Einfluß:

1. Temperatur (Bild C20)

Mit zunehmender Umgebungstemperatur nimmt die Hydratationsgeschwindigkeit zu.

2. Einfluß der Umgebungsfeuchte (Bild C21)

Wiedergegeben sind Versuchsergebnisse aus [C41] und [C42]. Die Proben lagerten während der ersten zwei Tage ihrer Erhärtung unter versiegelten Bedingungen, danach bis zum 14. bzw. 90. Tag im Labor (ca. 20 °C) bei unterschiedlichen Luftfeuchten.

Mit wachsender Umgebungsfeuchte nimmt der Hydratationsgrad zu, sofern die relative Feuchte größer als 60 bis 80 % ist (Einzelheiten siehe Bild C21).

Für die hier untersuchten Wände ergeben sich daraus folgende Konsequenzen:

Bei den Laborwänden sind die Unterschiede im Hydratationsgrad zwischen Oberflächenzone und Wandmitte größer als bei den im Freien aufgestellten Wänden. Auf Grund einer mittleren Außenluftfeuchte von ca. 85 % sind bis zu einem Alter von 90 Tagen Unterschiede im Hydratationsgrad zwischen nachbehandelten und nicht nachbehandelten Wandhälften der F-Wände ausgeglichen. Dies trifft nur eingeschränkt für die Laborwände zu. Unabhängig von der Lagerungsart dürfte dagegen der Hydratationsgrad in Wandmitte sein.

Mit zunehmendem Hydratationsgrad verändert sich auch die Feststoffstruktur hin zu dichteren und komplexer vernetzten Gefügen. Somit ist für die Oberflächenbereiche der F-Wände eine dichtere Porenstruktur zu erwarten als bei den L-Wänden.

5.4 Schlußfolgerung für die Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Porosität von Beton ist vielfältigen, sich z.T. gegenläufig überlagernden Einflüssen und Vorgängen ausgesetzt. Beton hat eine mit der Zeit, und infolge alleatorischer Einflüsse, in gleicher Wandtiefe von Ort zu Ort veränderliche Porosität, Porenradienverteilung und Porenstruktur. Ein Teil der Hydratationsprodukte ist instabil und reaktiv, so daß Veränderungen der äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte, reaktive Medien) zwangsläufig zu Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung und im Porensystem führen. Nicht alle diese Vorgänge sind reversibel.

Da außerdem keiner der in den vorhergehenden Abschnitten abgeleiteten Kennwerte einer Porenradienverteilung unter Berücksichtigung der Hydratationsbedingungen abgeleitet (außer der zufälligen Übereinstimmung von ϵ_{cap} und ϵ_{diff}), sondern nach statistischen bzw. physikalischen Aspekten festgelegt wurde, ist nicht ohne weiteres zu erwarten, daß sich chemische Vorgänge (Hydratation und Karbonatisierung) in ihnen widerspiegeln.

5.5 Schlußfolgerungen über den Einfluß der Witterung auf die Porosität und Porenradienverteilung von Beton

Faßt man die bisherigen Erkenntnisse von Abschn. C zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

Infolge herstellungsbedingter Einflüsse entsteht zwischen der Porosität der oberflächennahen Betonzone und derjenigen in Wandmitte ein Gefälle, da:

- a) In der oberflächennahen Betonzone mehr Zementleim vorhanden ist als im Mittel.
- b) Der oberflächennahe Beton trocknet nach dem Ausschalen bzw. dem Ende der Nachbehandlung aus. Dies führt zu einer schlechteren Hydratation und größeren Porosität oberflächennaher Betonschichten.

Die Einwirkung der Witterung führt auf folgende Veränderungen:

- a) Je nach Witterung kommt es in der oberflächennahen Betonschicht zu keiner bzw. nur geringen Nachhydratation. Die Bedingungen in Wandmitte

($d \geq 25$ cm) sind dagegen für die Nachhydratationen ausreichend. Dies vergrößert das Porositätsgefälle.

- b) Eine Veränderung der Porosität infolge Karbonatisierung ist nur oberflächennah möglich. Für PZ-Betone führt dies auf einen deutlichen Abbau der Porosität.
- c) Infolge Temperatur- und Feuchteänderungen ΔT und Δu ist eine Mikrorißbildung in oberflächennahen Betonschichten mit einer Zunahme der oberflächennahen Porosität denkbar.

Somit wird eine herstellungsbedingte Gradiente der Porosität zwischen Wandoberfläche und Wandmitte in Abhängigkeit der Witterungseinwirkung (für PZ-Betone) durch die Karbonatisierung nennenswert abgebaut und durch Nachhydratation vergrößert.

Mit zunehmendem Betonalter wandert das Maximum der Porosität von der Wandoberfläche in eine Tiefe die in etwa dem ein- bis zweifachen der Karbonatisierungstiefe entspricht. Dieses Maximum ist wesentlich flacher als im Ausgangszustand infolge der Überlagerung gegenläufiger Wirkungen von Hydratation und Karbonatisierung. Dieser Ausgleich zieht Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Betons nach sich. In Bild C22 sind diese Vorgänge schematisch dargestellt.

Für HOZ-Betone (drei der vier Versuchshäuser in Beckum) bei denen die Karbonatisierung je nach Hüttensandgehalt auf eine Zunahme der Porosität führt, ist dagegen mit einer Verstärkung des ursprünglich vorhandenen Gradienten zu rechnen.

Die Auswirkungen der Witterung auf die Dichtigkeit ergeben sich aus dem in Abschnitt 3 abgeleiteten Zusammenhang zwischen Porosität und Transportverhalten. Bei PZ-Beton ist für jede Wandtiefe mit einer witterungsbedingten Zunahme der Dichtigkeit zu rechnen, wobei die Karbonatisierung neben der Reduktion des Volumens der größeren Poren mit geringem Transportwiderstand eine dichtere Porenstruktur bewirkt.

6. ENTWICKLUNG EINES VORLÄUFIGEN DAUERHAFTIGKEITSMODELLS

6.1 Karbonatisierung

Ein Modell zur Prognose der Dauerhaftigkeit setzt neben der Definition des Begriffs Dauerhaftigkeit, die Kenntnis eines Beurteilungskriteriums voraus. Die Beurteilung muß unter Berücksichtigung der Streuung der zu beurteilenden Größen erfolgen (siehe Berichtsteil A). Hier gilt:

$$\max x_c(t) \leq \min c \quad (C24)$$

mit:

$\max x_c(t)$: Maximalwert der Karbonatisierungstiefe in [m] zum Zeitpunkt t nach Beginn der Karbonatisierung

$\min c$: Minimale Dicke der Betondeckung in [m]

Als Karbonatisierungsgesetz wird für die weiteren Ableitungen dasjenige von Schießl [C43] herangezogen. Dies hat folgende Gründe:

Dieses auf Grundlage der physikalisch-chemischen Reaktionskinetik abgeleitete Gesetz berücksichtigt folgende Teilvorgänge:

- a) Diffusion von CO_2 in den Beton.
- b) Berücksichtigung der chemischen Reaktionen durch die Annahme, daß das Fortschreiten der Karbonatisierung der Menge an CO_2 -bindbarer Substanz proportional ist, und daß die Reaktionsdauer gegenüber der Diffusionsdauer vernachlässigbar ist.
- c) Überlegungen zur Existenz einer Endkarbonatisierungstiefe.

Eine Endkarbonatisierungstiefe kann durch zwei Einflüsse zustande kommen:

- 1) Aus noch nicht karbonatisiertem Beton diffundiert ein Strom reaktiver Ionen in Richtung Karbonatisierungsfront. Dieser steht mit dem CO_2 -Strom im Gleichgewicht, wenn er in der Lage ist, daß gesamte eindiffundierende CO_2 zu binden. Dies liegt dem Karbonatisierungsgesetz von Schießl zugrunde.

2. Es existiert eine witterungsbedingte Endkarbonatisierungstiefe. Bei ungeschützten Bauteilen im Freien ist folgendes zu beachten. Während der Regendauer und der sich daran anschließenden Zeitspanne, die erforderlich ist, damit die bereits karbonatisierte Zone wieder austrocknet, ist keine weitere Karbonatisierung möglich. Wenn der mittlere Abstand zwischen zwei Regenfällen kleiner bzw. gleich der Austrocknungsdauer bereits karbonatisierter Bereiche ist, kann eine nennenswerte Zunahme der Karbonatisierungstiefe nicht mehr stattfinden.

Entsprechende Überlegungen wurden in [C45] angestellt. Sie finden hier keine Berücksichtigung.

Nach dem Karbonatisierungsgesetz von Schießl [C43] (Einzelheiten siehe dort) ergeben sich die Endkarbonatisierungstiefe

$$x_{c\infty} = \frac{D_{CO_2} \cdot \Delta c}{\bar{b}} \quad (C25)$$

und das Zeitgesetz der Karbonatisierungstiefe $x_c(t)$ als diejenige Tiefe für die gilt $x_c(t) = x_{pH<9,5}(t)$ zu:

$$t = - \frac{a}{\bar{b}} \left(x_c + x_{c\infty} \cdot \ln \left(1 - \frac{x_c}{x_{c\infty}} \right) \right) \quad (C26)$$

mit:

$x_{c\infty}$: Endkarbonatisierungstiefe in [m] für $t \rightarrow \infty$

D_{CO_2} : Diffusionskoeffizient für CO_2 in dem Gasraum der Betonporen, also unter Einschluß der Knudsen-Diffusion und einer repräsentativen Betonfeuchte in [m^2/h]

Δc : CO_2 -Konzentrationsgefälle in [kg/m^3]

\bar{b} : Rückkarbonatisierungskonstante in [$kg/(h \cdot m^2)$]

t : Betonalter in [h]

a : zur vollständigen Karbonatisierung des Betons erforderliche Menge an CO_2 in [kg/m^3]

$x_c(t)$: Karbonatisierungstiefe in [m] zum Zeitpunkt t

Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Bei der Abschätzung der karbonatisierbaren Substanz wird nur auf das Ca(OH)_2 zurückgegriffen. Die Karbonatisierung der CSH-Phasen findet keine Berücksichtigung.
2. Ebenso wird der Einfluß der alkalischen Ionen auf den pH-Wert vernachlässigt.
3. Die Gleichsetzung von Karbonatisierungstiefe und Farbumschlaggrenze des Phenolphthaleintests bei einem pH-Wert von ca. 9,5 gilt nur näherungsweise.

6.2 Verknüpfung Absorption-Diffusion

Um aus diesem Karbonatisierungsgesetz und dem Beurteilungskriterium ein Instrument der Dauerhaftigkeitsprognose ableiten zu können, das in Abhängigkeit der zerstörungsfrei gemessenen Absorptionskennwerte eine Prognose zuläßt, ist der Diffusionskoeffizient, in seiner Funktion als maßgebende Größe der Betondichtigkeit durch den ISA-Wert bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung zu ersetzen.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.2.3 festgestellt wurde, beruhen Diffusionsvorgänge und Vorgänge der kapillaren Wasseraufnahme auf unterschiedlichen physikalischen Ursachen:

1. Sie finden in getrennten Teilen der Porosität statt, die sich nur partiell überschneiden und eine unterschiedliche Abhängigkeit von den Parametern w/z-Wert, Lagerungsbedingung, Nachbehandlung usw. aufweisen.
2. Sie weisen eine unterschiedliche Abhängigkeit vom Porenradius auf.

Den dortigen Überlegungen folgend, ist zu untersuchen ob für Beton und Mörtel die Hydratations- und Karbonatisierungsbedingungen so sind, daß für Betone gleicher Zusammensetzung, Nachbehandlung und Lagerungsbedingung ϵ_{abs} und ϵ_{diff} voneinander abhängen. Dazu sind in den beiden Bildern C23 und C24 Ergebnisse von Porenradienverteilungen die [C22,C31,C34] entnommen wurden ausgewertet. Über ϵ_{abs} ist die zugehörige Größe von ϵ_{diff} aufgetragen. Es wurden jeweils alle in den Quellen angegebenen Ergebnisse berücksichtigt, ohne weitere Unterscheidung hinsichtlich

- der Betonzusammensetzung (Zementart, w/z-Wert, Sieblinie)
- der Nachbehandlung
- der Lagerungsbedingungen und sonstige Probenbehandlungen
- dem Alter
- der Untersuchungstiefe aus der die Probe stammt.

Die Vernachlässigung dieser Einflüsse läßt dennoch erkennen, daß zwischen ϵ_{abs} und ϵ_{diff} eine lineare Abhängigkeit besteht; also gilt:

$$\epsilon_{\text{diff}} = a + b \cdot \epsilon_{\text{abs}} \quad (\text{C27})$$

Im Berichtsteil D wird eine entsprechende Auswertung der Versuchsergebnisse durchgeführt.

Die gegenseitige Beziehung zwischen den Transportkoeffizienten D_{CO_2} und ISA_{10} ergibt sich mit den Gl.(C20), (C23) und (C27) zu:

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{k(r_{h,\text{diff}})}{a_{t,\text{diff}}} \left(a + b \frac{a_{t,\text{abs}} \cdot \text{ISA}_{10}}{k_3 \cdot \sqrt{2} r_{h,\text{abs}}} \right) = c_1 + c_2 \cdot \text{ISA}_{10} \quad (\text{C28})$$

wobei die Regressionskonstanten a und b aus den Ergebnissen der hier durchgeführten Versuche bzw. den Bildern C23 und C24 abzuleiten sind. Zu beachten ist, daß die Porenradienverteilung an getrockneten Proben gemessen wurde und die Regressionskoeffizienten somit auch nur für diese Verhältnisse gelten. Dem steht ein ISA_{10} -Wert gegenüber, der auf einer Betonoberfläche gemessen wurde, deren Feuchtegehalt unbekannt ist bzw. einem Feuchtegehalt entspricht, dem mindestens 48 Stunden Regenfreiheit vorangegangen sind. Da der Einfluß der Feuchte auf das Verhältnis ϵ_{diff} zu ϵ_{abs} nicht untersucht wurde, stellt die Anwendung obiger Gleichung nur eine Annäherung an wirkliche Bauwerksverhältnisse dar.

Außerdem ist zu beachten, daß für eine Dauerhaftigkeitsbeurteilung auf Basis von ISA_{10} -Messungen bei unbekannter, nicht gemessener Betonfeuchte, die Messungen zu Zeitpunkten durchzuführen sind, zu denen die Betondeckung eine Feuchte aufweist, die "repräsentativen Karbonatisierungsverhältnissen", betrachtet über den Zeitraum der Dauerhaftigkeit, entspricht. Nur diese

"mittlere Dichtigkeit" ist für die diffundierbare Porosität über einen mehrjährigen Zeitraum maßgebend. Auch zu diesem Aspekt erfolgten hier keine näheren Untersuchungen.

6.3 Erläuterung zum Beurteilungskriterium

Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit erfolgt durch Vergleich der vorhandenen bzw. vorhergesagten Karbonatisierungstiefe mit der Dicke der Betondeckung, ohne daß ein Schadensfall (Korrosion der Bewehrung) eingetreten ist. Für die beiden Größen Karbonatisierungstiefe und Betondeckung werden deshalb die 95% bzw. 5% Fraktilwerte zugrundegelegt.

Anhaltswerte zur Streuung der Dicke der Betondeckung und der Karbonatisierungstiefe sind der Literatur zu entnehmen. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, daß beide Größen durch eine Normalverteilung beschrieben werden können, obwohl dies formal natürlich nicht möglich ist.

Auch hierbei ist zwischen dem Fehler erster Art (Die Wahrscheinlichkeit α , daß ein dauerhaftes Bauwerk als nicht dauerhaft eingeschätzt wird, soll klein sein) und dem Fehler zweiter Art (Die Wahrscheinlichkeit β , daß ein nicht mehr dauerhaftes Bauwerk, als dauerhaft beurteilt wird, soll klein sein) zu unterscheiden und eine ausgewogene Abgrenzung zu finden. (Da es nicht zu den Zielen dieses Forschungsvorhabens gehört, eine entsprechende Annahmekennlinie festzulegen und auch nicht geprüft werden soll, ob eine Annahmekennlinie für diese Fragestellung überhaupt sinnvoll ist, wird auf diesen Aspekt des Beurteilungskriteriums nicht weiter eingegangen).

Stattdessen wird die Überschneidung von Karbonatisierung und Betondeckung minimiert, um auch bereits örtliche Korrosionsmöglichkeiten auszuschließen.

6.4 Vorläufiges Bemessungsdiagramm der Betondauerhaftigkeit

6.4.1 Erläuterungen

Die folgenden Ausführungen gelten für Stahlbetonbauteile mit den Bedingungen:

- Betongüte \geq B 25 mit 16 mm Größtkorn;
- maximaler Stabdurchmesser 25 mm;
- Bauteile im Freien, ungeschützt oder unter Dach sowie solche in Innenräumen.

Die Auswertung von Tab. 10, DIN 1045 ergibt die in Bild C25 dargestellte Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Dicke der Betondeckung von der Dicke der Betondeckung. Dabei wird das Nennmaß der Betondeckung als Mittelwert und näherungsweise das Mindestmaß als Wert der 5 %-Fraktile angesehen. Diese Umrechnung des Vorhaltemaßes wird durchgeführt, um einen Vergleich mit Meßergebnissen vornehmen zu können.

Der Vergleich mit Meßergebnissen aus [C46], [C47] und [C48] zeigt, daß mit den Regelungen von DIN 1045 (7.88) die Streuung der Betondeckung älterer Bauwerke unterschätzt wird. Hieraus dürfen keine Schlußfolgerungen für solche Bauwerke gezogen werden, die nach den Regeln von DIN 1045 (7.88) errichtet werden. Die o.g. Tatsache stellt einen wichtigen Unterschied bei der Beurteilung bestehender (alter) Gebäude und in der Abnahme von Neubauten dar.

Eine Reihe von Veröffentlichungen enthält Angaben zur mittleren und maximalen Karbonatisierungstiefe ([C49-C51]), siehe die Bilder C26, C27 und C28. Dabei zeigt sich, daß die maximale Karbonatisierungstiefe - unabhängig von den unterschiedlichen Parametern und Lagerungsbedingungen - in der Mehrzahl aller Fälle um nicht mehr als 10 mm über der mittleren Karbonatisierungstiefe liegt:

$$x_{C,max} \leq \bar{x}_C + 10 \quad [\text{mm}] \quad (C29)$$

Deutet man näherungsweise die Karbonatisierungsspitze $x_{C,max}$ als 95%-Fraktile so gilt mit:

$$x_{C,95} = \bar{x}_C + 1,64 \cdot s, \quad (C30)$$

für die Standardabweichung s :

$$s = 10/1,64 = 6,1 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm} \quad (C31)$$

Obwohl, wie Bild C28 zeigt, die Standardabweichung nicht konstant ist, wird vereinfachend von einer konstanten Standardabweichung ausgegangen. Für das Verhältnis $x_{C,95}$ zu \bar{x}_C erhält man somit aus:

$$x_{C,95} = \left(1 + 1,64 \cdot \frac{s}{\bar{x}_C}\right) \cdot \bar{x}_C = f_k \cdot \bar{x}_C \quad (C32)$$

einen Faktor f_k , der zwar von der mittleren Karbonatisierungstiefe abhängig ist, für den aber im Mittel gilt:

$$x_{C,95} \approx 1,7 \cdot \bar{x}_C. \quad (C33)$$

6.4.2 Vorläufiges Bemessungsdiagramm

Mit den Zusammenhängen von Abschnitt 6.4.1 kann man ein "vorläufiges Bemessungsdiagramm der Dauerhaftigkeit" entwickeln (siehe Bild C29).

Im unterem Bildteil ist getrennt für die Fälle

- Beurteilung bestehender Gebäude
- Abnahme von Bauwerken

die Summenhäufigkeit angegeben, mit der für einen Nennwert der Betondeckung von $c = 3,5$ cm, Werte der Betondeckung unterschritten werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß keine Abweichungen von der angestrebten mittleren Dicke der Betondeckung vorliegen. Im oberem Bildteil ist die Dauerhaftigkeit in Jahren ablesbar. Sie ergibt sich als der Schnittpunkt der 95 %-Fraktile der Karbonatisierungstiefe, die in Abhängigkeit des ISA-Wertes angegeben ist (einsetzen von Gl. (C28) in das Karbonatisierungsgesetz), mit der Vertikalen durch diejenige Tiefe die der 5 %-Fraktile der Dicke der Betondeckung entspricht (Beispiel siehe Bild C29). Anhaltswerte zum Einfluß des w/z - Wertes, des Alters und der Nachbehandlung auf den ISA_{10} -Wert können Bild C30 entnommen werden. Es handelt sich um die Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen an den Wänden I - VIII.

Darüberhinaus erhebt sich die Frage in welchem Alter der ISA-Wert zu messen ist, um zu einer wirklichkeitsnahen Beurteilung der Dauerhaftigkeit zu gelangen. Die Zeitabhängigkeit ergibt sich aus den Umständen

- Austrocknung des Überschußwassers,
- Hydratation,
- Karbonatisierung,
- Veränderungen des Feuchtegehalts infolge Witterung.

Bei der Beurteilung bestehender, alter Bausubstanz ist davon auszugehen, daß Austrocknungs- und Hydratationsvorgänge des Betons der Betondeckung weitgehend abgeschlossen sind. Auch die Karbonatisierung wird soweit fortgeschritten sein, daß sie für die unmittelbare Oberflächenzone keine eigenschaftsverändernde Wirkung mehr hat. Somit ist nur der Einfluß der Feuchte zu beachten. Dieser kann durch die Prüfredung, die Messung mindestens 48 Stunden nach dem letzten Regenfall durchzuführen, begrenzt werden.

Bei der Abnahme von Neubauten spielen dagegen alle Einflüsse eine Rolle. Messungen in diesem Alter sind dementsprechend kritischer hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu bewerten.

Die Koeffizienten a und b bzw. c_1 und c_2 hängen von den Parametern

- Zementart
- Nachbehandlung
- Alter
- Lagerungsbedingungen
- Feuchtegehalt des Betons

ab. Im Rahmen dieser Arbeit konnten nicht alle sich daraus ergebenden Zusammenhänge ermittelt werden. Die im Abschnitt D angegebenen Diagramme, deren Ableitung auf den Ergebnissen der hier untersuchten Bauteile beruht, besitzen deshalb nur eine begrenzte Anwendungsbreite.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [C1] Jeschar, R.: Druckverlust in Mehrkornschüttungen aus Kugeln. Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (1964), H. 2, S. 91/108.

- [C2] Engelfried, R.: Diffusionswiderstandszahlen für Kohlendioxid und Wasser und deren praktische Anwendung. Lack und Farbe 89 (1983), H. 7, S. 513/518.
- [C3] Diamond, S.: The Microstructure of Cement Paste in Concrete. Eighth International Conference on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986.
- [C4] Schönlin, K.: Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation, Karlsruhe, 1989.
- [C5] Stöckl, S.: Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzone von Beton. Heft 185 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin, 1966.
- [C6] Lang, H.: Zur Diffusion und Strömung in Kapillaren und porösen Feststoffen. Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Bericht 6, 1977.
- [C7] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag, Wiesbaden, 1974.
- [C8] Gertis, K.; Kießl, K.; Werner, H.; Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. Heft 258 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- [C9] Landolt - Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. 6. Auf., 1. Bd., 1. Teil, Berlin, 1950.
- [C10] Hirschfelder; Curtiss; Bird: Molecular theory of gases and liquids, New York, 1954.
- [C11] Krischer, O.: Zum Problem der Gasbewegung durch porige Güter. Schweizerische Bauzeitung 80 (1962), H. 49, S. 819/827.
- [C12] Cammerer, W.F.: Die kapillare Wasserbewegung in porösen Körpern. VDI Forschungsheft 500, 1963.
- [C13] Lutz; Jenisch; Klopfer; Freymuth; Krampf: Lehrbuch der Bauphysik. Stuttgart, 1985.

- [C14] Lykow, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Berlin, 1958.
- [C15] Schubert: Kapillarität in porösen Feststoffsystemen, Berlin, 1982.
- [C16] Schwiete, H.E.; Ludwig, U.: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. Tonindustriezeitung 90 (1966), H. 12, S. 562/574.
- [C17] Stamm, K.H.D.: Modell zur quantitativen Erfassung der physikalischen Vorgänge bei der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in Bauteilen. Dissertation, Aachen, 1979.
- [C18] Bunte, D.: Zur Dauerhaftigkeit von Beton gegenüber Witterungsbeanspruchungen. In: Heft 87 der Schriftenreihe des iBmB, TU Braunschweig, 1989.
- [C19] Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Dauerhaftigkeit von Beton bei kombinierter physikalisch-chemischer Beanspruchung im Hinblick auf Verwitterungsprozesse - Zusammenfassung der wesentlichen Forschungsergebnisse. Forschungsbericht, iBMB, TU Braunschweig, 1990.
- [C20] Kiehl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation, Essen, 1983.
- [C21] Stockhausen, N.; Dorner, H.; Zech, B.; Setzer, M.J.: Untersuchungen von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA. Cement and Concrete Research 9 (1979), p. 783/794.
- [C22] Romberg, H.: Zur Porosität und Porenradienverteilung in alten Betonen. TIZ-Fachberichte Rohstoff Engineering, H. 12, S. 811/817, 1980.
- [C23] Wierig, H.-J.; Hurling, H.: Untersuchungen zur Sauerstoffdiffusion durch die Betondeckung der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen. Forschungsbericht, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, TU Hannover, 1983.
- [C24] Bažant, Z.P.; Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, p. 3/20, 1972.

- [C25] Graf,U.; Henning,H.J.; Stange,K.: Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. 2. Auflage, Berlin, 1966.
- [C26] Irani,R.R.; Callis,C.F.: Particle Size: Measurement, Interpretation and Application. New York, 1963.
- [C27] Heinhold,J.; Gaede,K.-W.: Ingenieur - Statistik. München, 1979.
- [C28] Hinrichsmeyer,K.; Abdul-Maula,S.; Diederichs,U.; Rostásy,F.S.: Quecksilberdruckporosimetrie - Ringversuche an erhärteten Zementstein. Forschungsbericht, iBMB, TU Braunschweig, 1988.
- [C29] Kayyali,O.A.: Mercury intrusion porosimetry of concrete aggregates. Matériaux et Constructions, Vol. 18, No. 106, p. 259/262.
- [C30] Wischers,G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. Beton 11 (1961), H. 7, S. 481/486.
- [C31] Haegermann,B.: Zum Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Betonqualität unter besonderer Berücksichtigung des Frost-Tausalz-Widerstands. Dissertation, Wuppertal, 1987.
- [C32] Smolczyk,H.G.; Romberg,H.: Der Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton. Tonindustriezeitung 100 (1976), H. 10, S. 349/357 und H. 11, S. 381/390.
- [C33] Setzer,M.J.: Transportvorgänge und Porenstruktur - Wassertransport. In: Erhalten von Beton, Internationales Kolloquium, Wien, 17./18. Nov. 1986. Heft 39 der Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten.
- [C34] Bier,T.A.: Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Dissertation, Karlsruhe, 1988.
- [C35] Zimbelmann,R.: A contribution to the problem of cement-aggregate bond. Cement and Concrete Research, Vol. 15, p. 801/808, 1985.
- [C36] Hinrichsmeyer,K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Dissertation, Braunschweig, 1987.

- [C37] Feldmann, R.F.: The effect of sand/cement ratio and silica fume on the microstructure of mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 16, p. 31/39, 1986.
- [C38] Pihlajavaara, S.E.: Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste. Matériaux et Constructions, Vol. 1, No. 6, 1968, p. 521/526.
- [C39] Kropp, J.: Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Dissertation, Karlsruhe, 1983.
- [C40] Laube, M.: Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Betonbauteilen im jungen Alter. Dissertation, Braunschweig, 1990.
- [C41] Parrott, L.J.; Killoh, D.C.; Patel, R.G.: Cement hydration under partially saturated curing conditions. Eighth International Conference on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986, Vol. 3, p. 46/50.
- [C42] Patel, R.G.; Killoh, D.C.; Parrott, L.J.; Gutteridge, W.A.: Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. Materials and Structures: Research and Testing, Vol. 21, No. 123, p. 192/197, 1988.
- [C43] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Heft 255 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- [C44] Meyer, A.; Wierig, H.-J.; Husmann, K.: Karbonatisierung von Schwerbeton. Heft 182 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1967.
- [C45] Schießl, P. (editor): Corrosion of Steel in Concrete. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC, London, 1988.
- [C46] Schuhbauer, A.: Betonüberdeckung und Karbonatisierungstiefe. Beton, H. 4; S. 157/160, 1987.

- [C47] Sohni,M.: Case study on durability. Darmstadt Concrete, Vol. 3, 1988.
- [C48] Stangenberg,F.; Kiefert,H.: Erfahrungen bei der Qualitätskontrolle von Stahlbetonbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 83 (1988), H. 2, S. 53/58.
- [C49] Kleinschmitt,H.-J.: Untersuchungen über das Fortschreiten der Carbonatisierung an Betonbauwerken. Heft 170 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1965.
- [C50] Lehmann,H.: Vergleichende Untersuchungen des Karbonatisierungsverlaufs von Betonen mit und ohne Flugstaubzusatz. Forschungsbericht der Wasser- und Schifffahrtsdirektion West, Münster, 1986.
- [C51] Curie,R.J.: Carbonation depths in structural-quality concrete: an assessment of evidence from investigations of structures and from other sources. Building Research Establishment Report, Watford, 1986.

TABELLEN

TEIL C

Tab. C1: Diffusionswiderstandszahlen von Mörtel (Putz) und Beton
für die Diffusion von CO₂ und H₂O (Wasserdampf)
(nach [C2])

Baustoff	Diffusionswiderstand bei Diffusion von	
	CO ₂	H ₂ O
Zement der Mörtelgruppe III (DIN 18550)	70	20
Beton der Güte B25 - B45	200 - 500	40 - 70

Tab. C2: Gaskinetische Eigenschaften von Gasmolekülen (nach [C9, C10])

Eigenschaft	Formel- zeichen	Einheit	Berechnungs- formel	Gasart					
				WD	N ₂	O ₂	CO ₂	He	Luft
Spezielle Gaskonstante	R	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	-----	461,5	297,0	260,0	188,8	2080,0	286,8
Atomare bzw. molare Masse	m	kg	$\frac{k}{R}$	$2,99 \cdot 10^{-26}$	$4,65 \cdot 10^{-26}$	$5,31 \cdot 10^{-26}$	$7,31 \cdot 10^{-26}$	$6,64 \cdot 10^{-27}$	$4,81 \cdot 10^{-26}$
Gasdichte (p = 1 bar, T = 293 K)	ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\frac{p}{R T}$	0,7395	1,1490	1,3130	1,8080	0,1641	1,1900
Effektiver Molekül- durchmesser (T ≈ 293 K)	d _i	m	-----	$3,90 \cdot 10^{-10}$	$3,75 \cdot 10^{-10}$	$3,54 \cdot 10^{-10}$	$3,90 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^{-10}$	$3,73 \cdot 10^{-10}$
Mittlere freie Weg- länge (p = 1 bar, T = 293 K)	λ	m	$\frac{M}{\sqrt{2} \pi d_{i,j}^2 N_A \rho}$	$59,90 \cdot 10^{-9}$	$65,80 \cdot 10^{-9}$	$72,60 \cdot 10^{-9}$	$59,90 \cdot 10^{-9}$	$191,50 \cdot 10^{-9}$	$64,00 \cdot 10^{-9}$
Molare Masse	M	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	$\frac{R_M}{R}$	18,02	28,00	31,98	44,04	3,998	28,99
Effektiver Gasdurch- messer bei Diffusion in Luft (1: Gas, 2: Luft)	d _{1,2}	m	$0,5(d_1 + d_2)$	$3,82 \cdot 10^{-10}$	$3,72 \cdot 10^{-10}$	$3,65 \cdot 10^{-10}$	$3,82 \cdot 10^{-10}$	$2,96 \cdot 10^{-10}$	--

Allgemeine Größen: Boltzmann Konstante: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
 Universelle Gaskonstante: $R_M = 8315 \text{ J/(kmol K)}$
 Avogadro Konstante: $N_A = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ 1/kmol}$

Tab. C3: Größe des Verhältnisses ISA_{10} zu g_{CO_2} für angenommene Werte des Verhältnisses r_{abs}/r_{diff} und r_{diff} .

$\frac{r_{abs}}{r_{diff}}$	r_{diff} [nm]	$\frac{ISA_{10}}{g_{CO_2}}$ für $\frac{\epsilon_{abs}}{\epsilon_{diff}} = 1$
1,5	65	248.445
	80	250.458
	100	255.636
	140	269.497
	im Mittel	256.000
2,0	50	288.367
	60	286.809
	100	295.182
	140	311.188
	im Mittel	295.400
2,5	40	328.189
	60	320.663
	100	330.024
	140	347.919
	im Mittel	331.700
3,0	33,3	368.065
	60	351.279
	100	361.523
	140	381.126
	im Mittel	365.498

ABBILDUNGEN

TEIL C

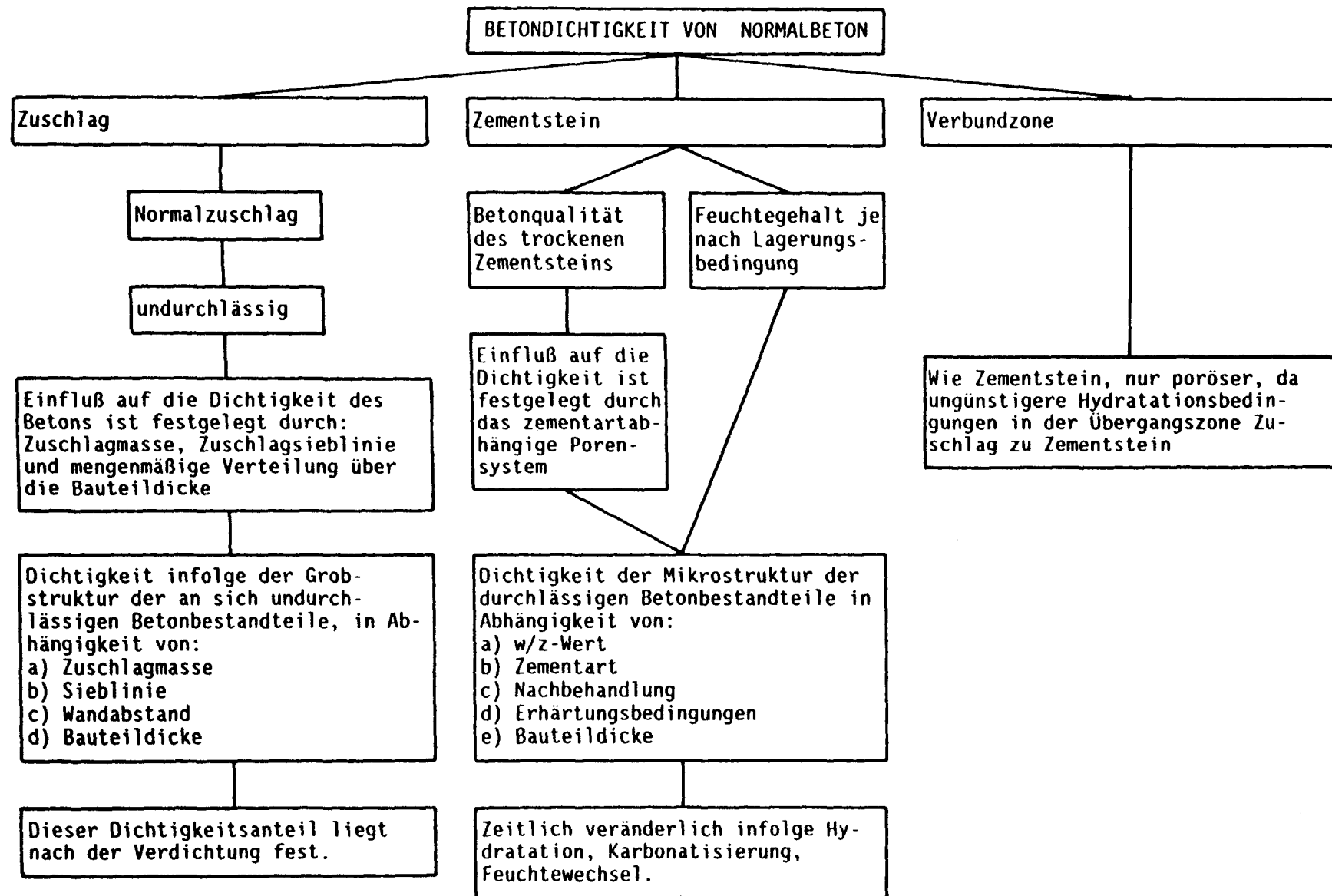


Bild C1: Betondichtigkeit als Folge des Zusammenwirkens der drei Teildichtigkeiten für den Zuschlag, den Zementstein und die Verbundzone Zuschlag - Zementstein.

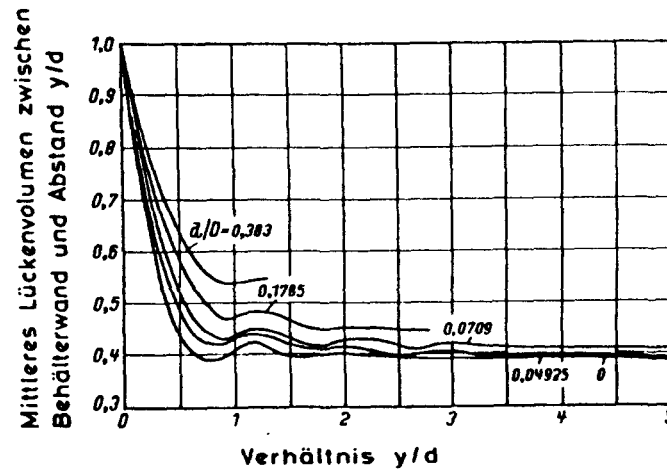
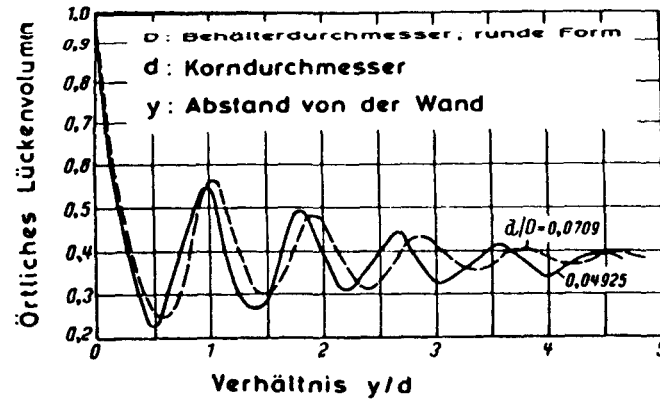


Bild C2: Lückenvolumen von Kugelschüttungen.

oben: Radiale Verteilung des örtlichen Lückenvolumens.

unten: Radiale Verteilung des mittleren Lückenvolumens (Mittelwert des Lückenvolumens der Strecke Behälterwand bis zur betrachteten Tiefe, nach [C2]).

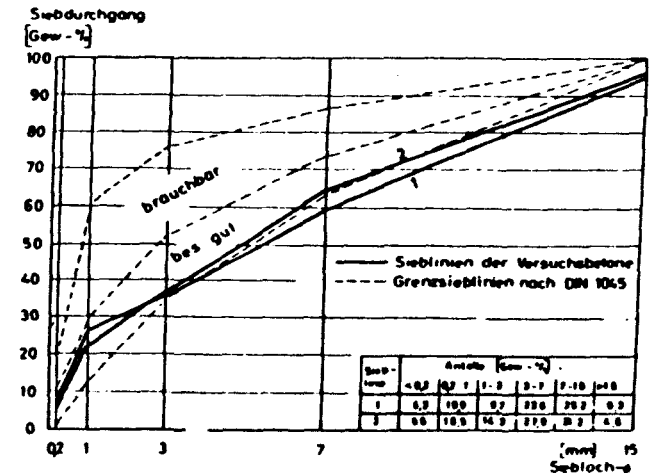
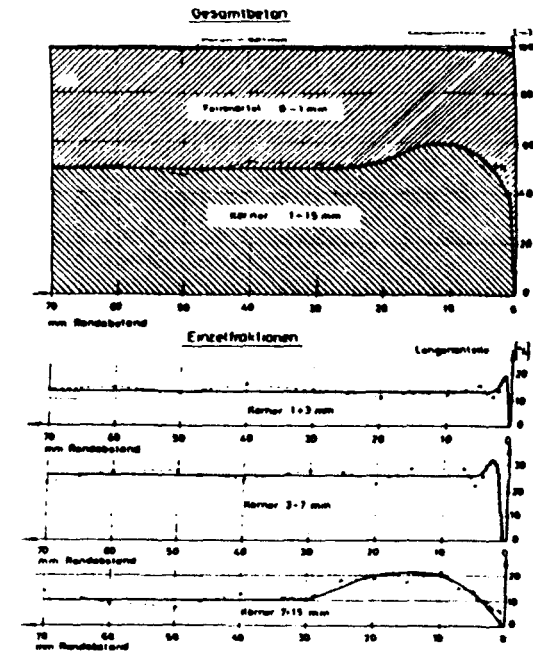


Bild C3: Verteilung von Zuschlag und Zementmörtel in der schalungsnahen Betonrandzone.

oberes Bild: Kornstruktur der Betonrandzone.

unteres Bild: Verwendete Zuschlagsieblinie (für diesen Teil der Untersuchungen gilt Linie 1).

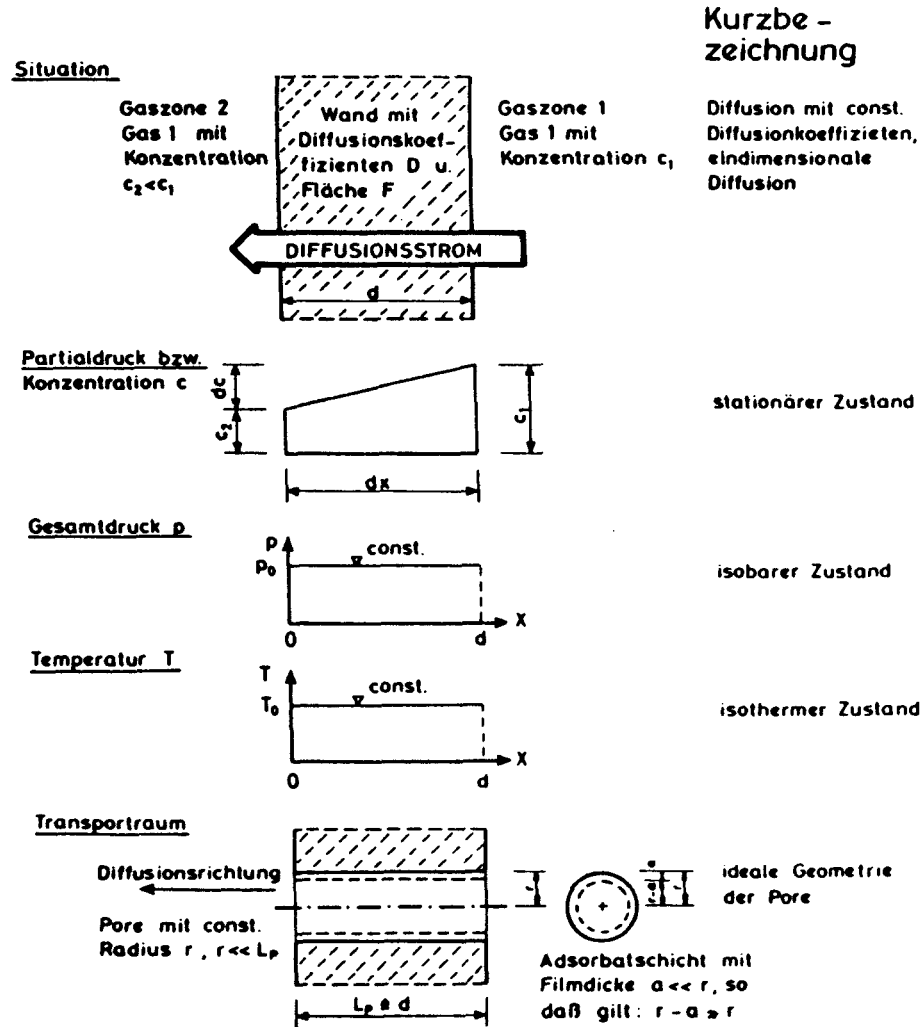


Bild C4: Zusammenstellung der Voraussetzungen und Randbedingungen für die hier durchgeführten Betrachtungen zur Diffusion von Gasen durch idealisierte Betonporen.

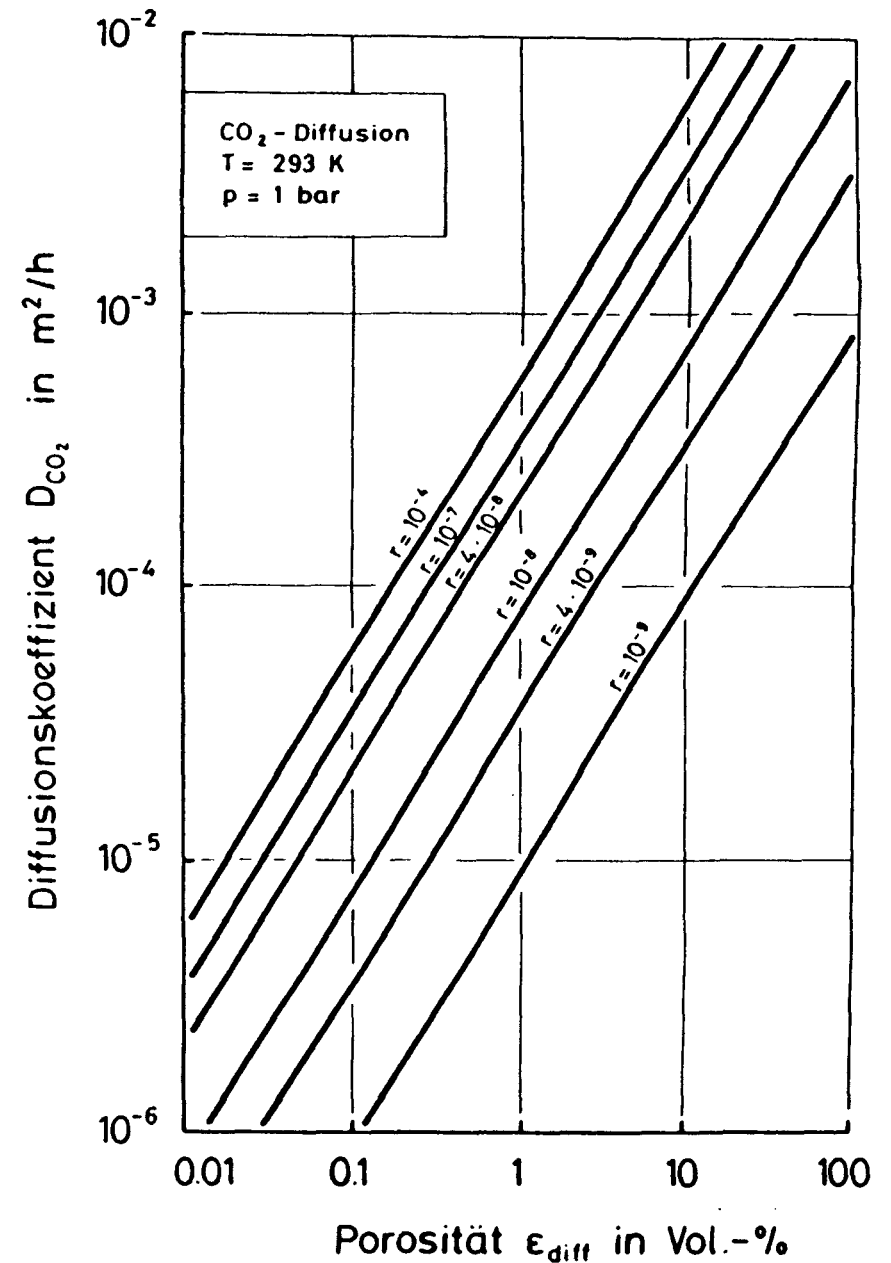


Bild C5: Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Porosität für verschiedene Porenradien unter der Annahme idealisierter Bedingungen.

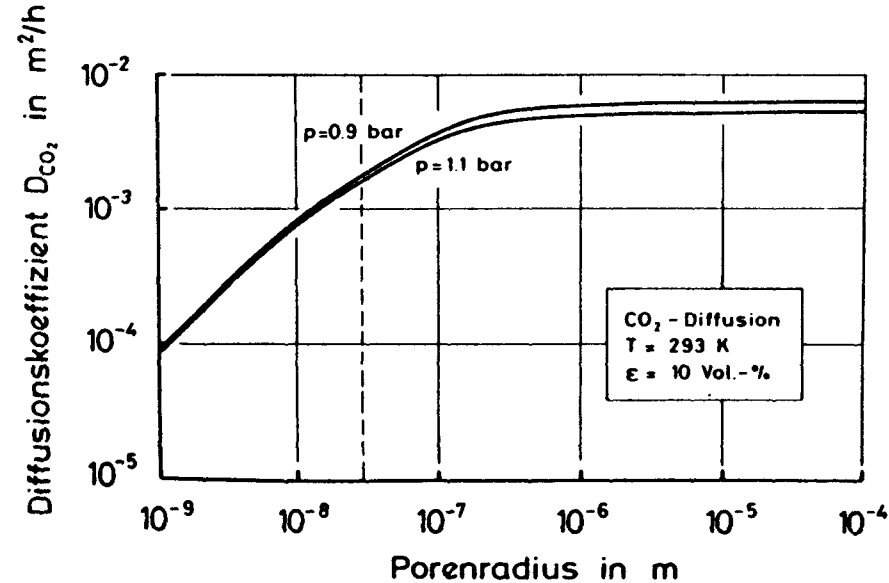
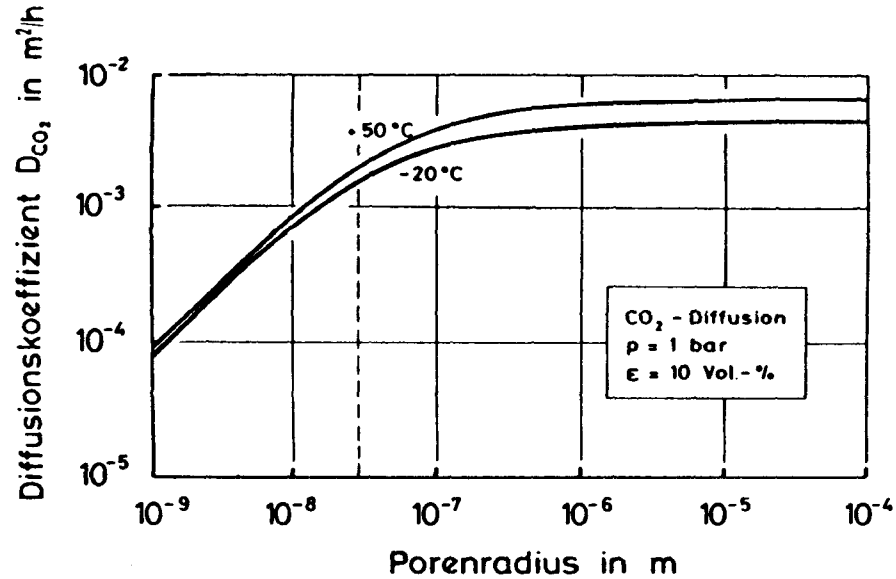


Bild C6: Einfluß der äußeren Randbedingungen Temperatur und Luftdruck auf die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vom Porenradius.
 obere Bildhälfte: Einfluß der Temperatur.
 untere Bildhälfte: Einfluß des Luftdruckes.

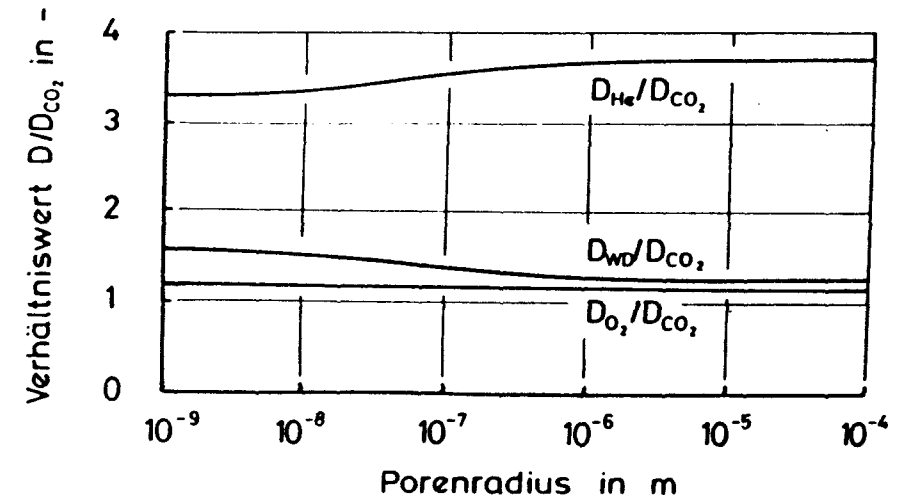
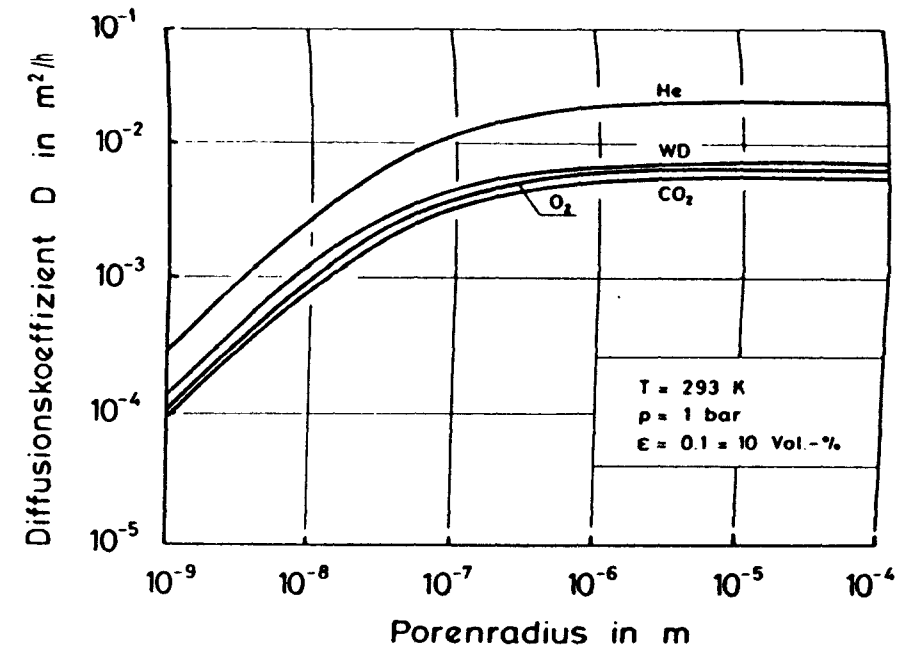
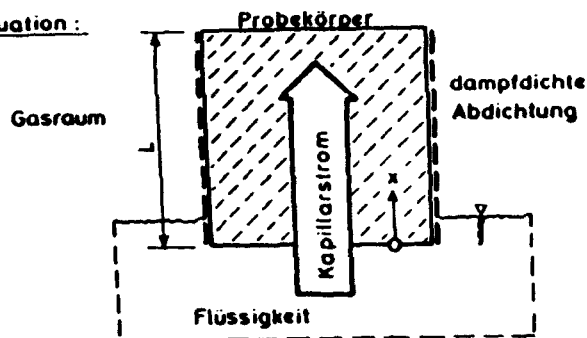


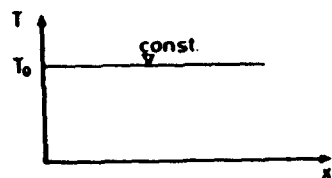
Bild C7: Einfluß der Gasart auf die vom Porenradius abhängige Größe des Diffusionskoeffizienten.
 obere Bildhälfte: Die Gasarten im einzelnen.
 untere Bildhälfte: Gasartabhängige Verhältnisse der Diffusionskoeffizienten.

Situation:



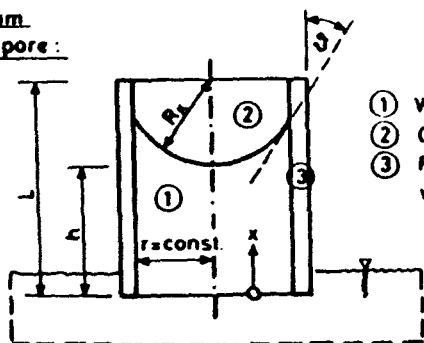
Eindimensionale Kapillarleitung durch einen Probekörper mit der benetzten Grundfläche F und ohne das Vorhandensein von äußeren Flüssigkeitsdrücken.

Temperatur T :



isothermer Zustand

Transportraum einer Einzelpore:



- ① Wasser
- ② Gasphase (Luft)
- ③ Feststoff, Porenwandung

ideale Geometrie der Pore

Bild C8: Voraussetzungen und Randbedingungen für die Betrachtungen zur kapillaren Wasseraufnahme idealisierter Betonporen.

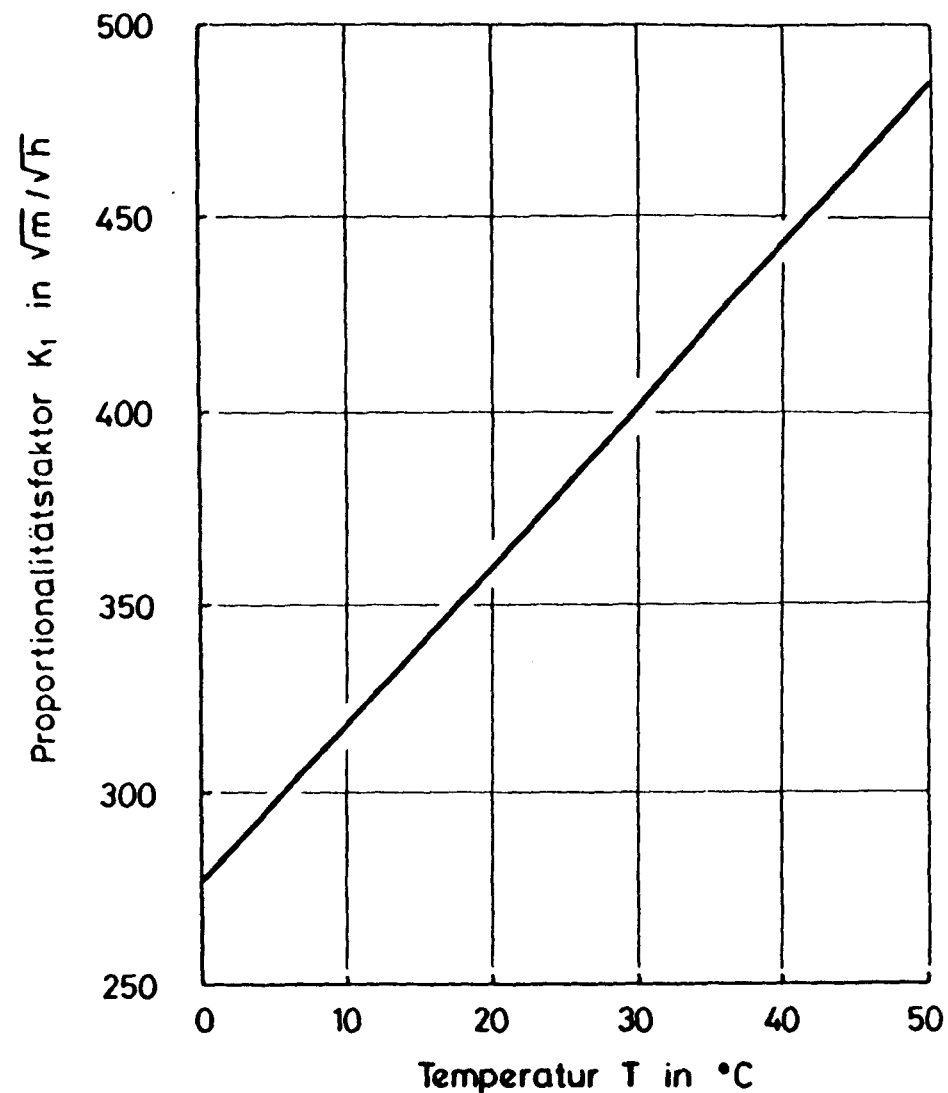


Bild C9: Abhängigkeit der physikalischen Konstanten k_1 der kapillaren Wasseraufnahme von der Temperatur.

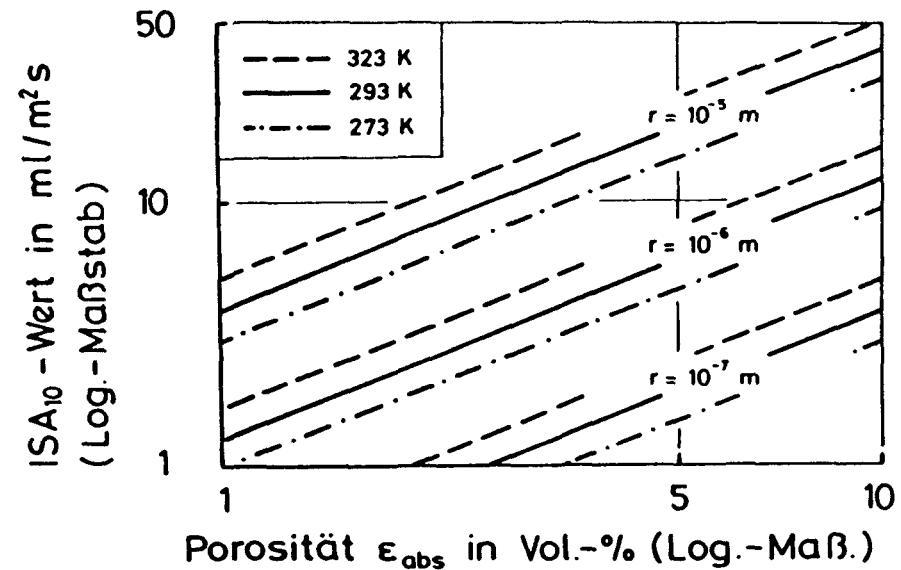
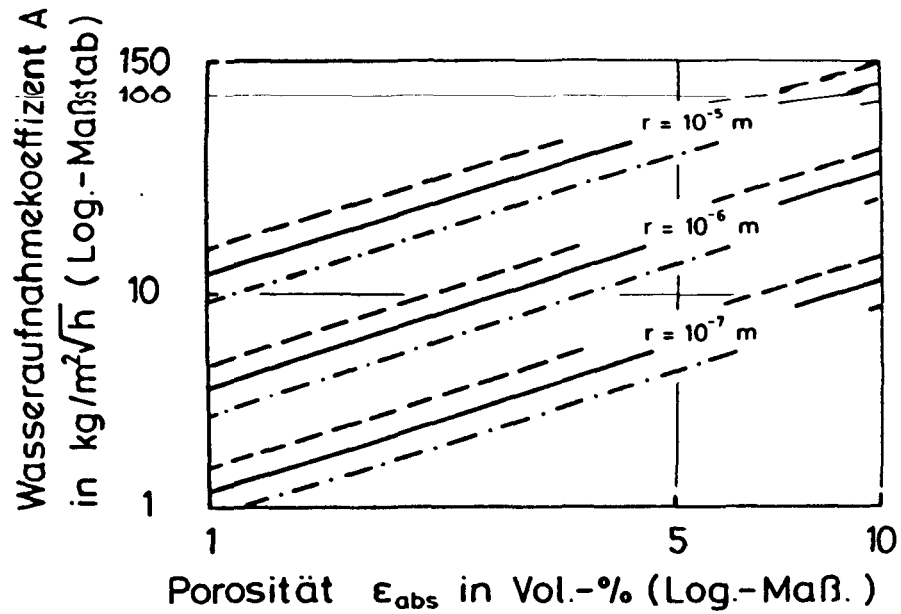


Bild C10: Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA - Wertes von der Porosität für verschiedene Porenradien und Temperaturen.

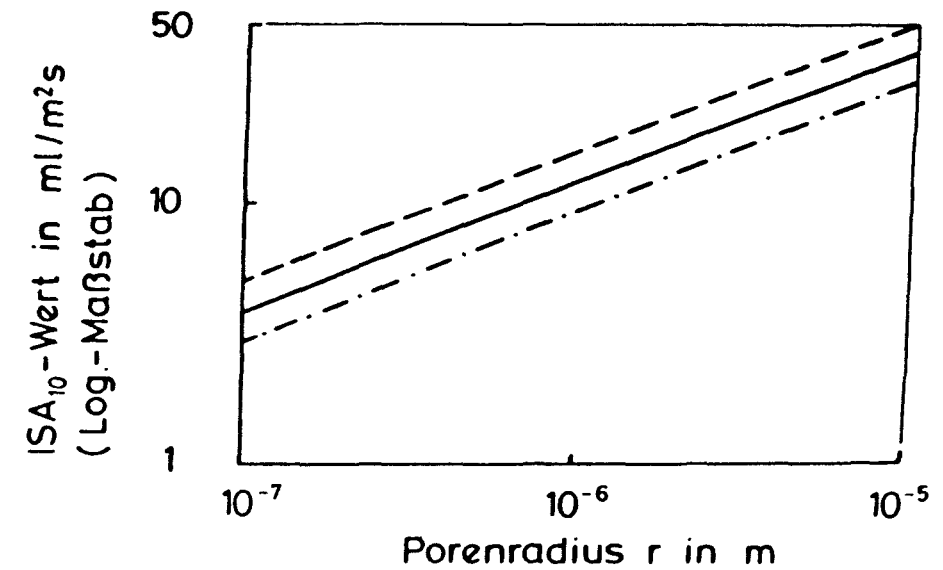
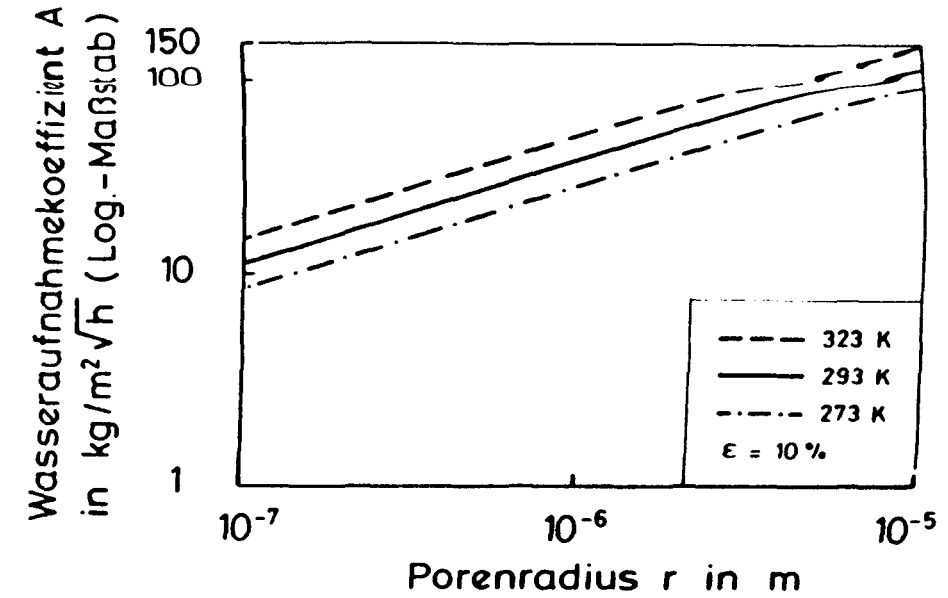


Bild C11: Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA - Wertes vom Porenradius für verschiedene Temperaturen und der Annahme einer kapillar wirksamen Porosität von 10 Vol.-%.

Reales Porenmodell

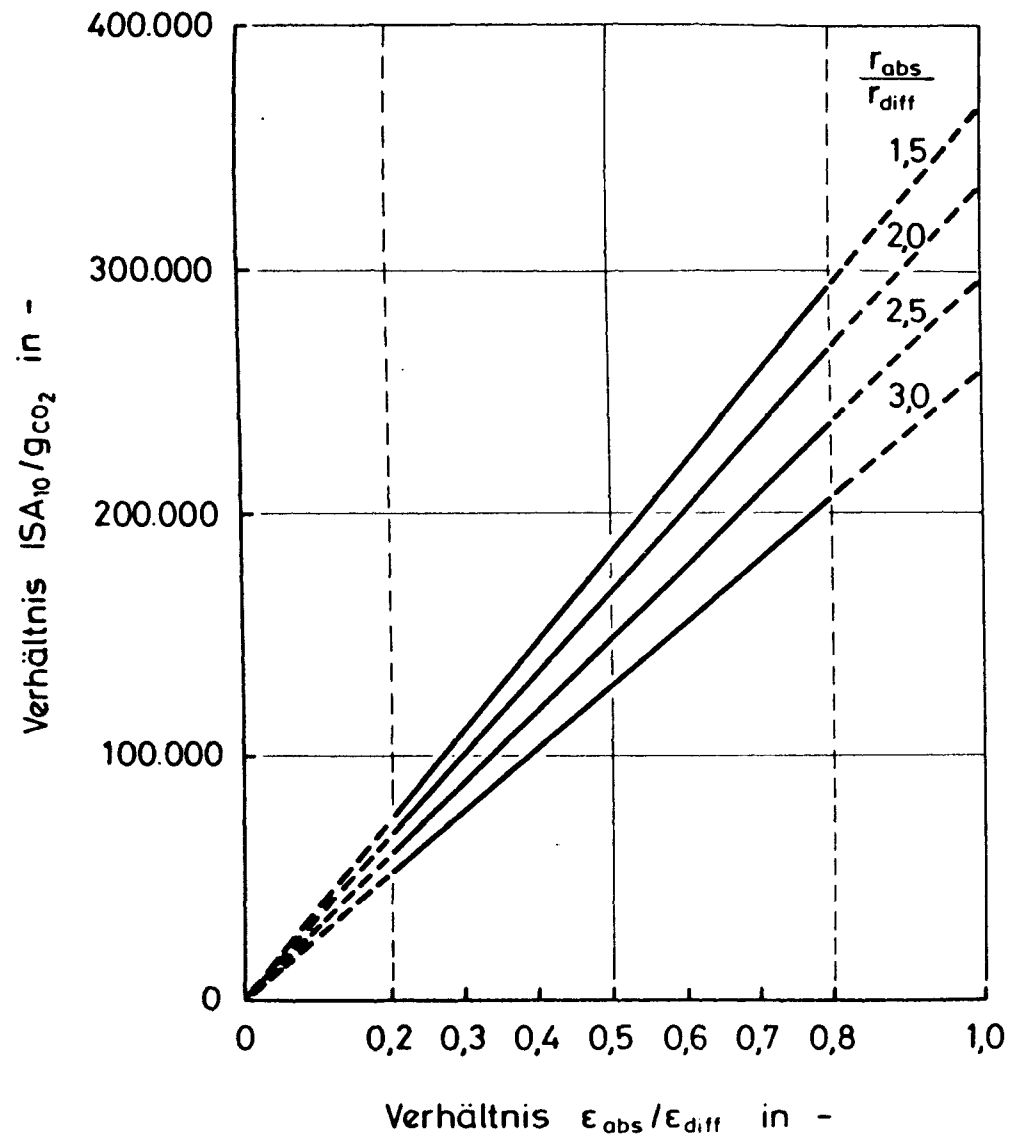
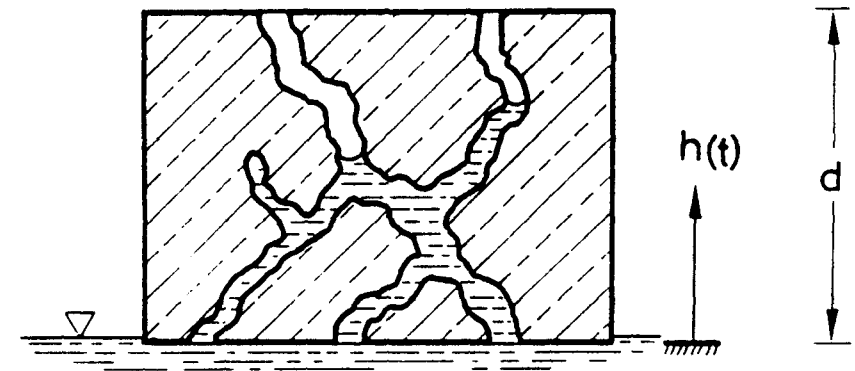


Bild C12: Abhängigkeit des Verhältnisses ISA_{10}/g_{CO_2} vom Verhältnis $\epsilon_{abs}/\epsilon_{diff}$ für verschiedene Werte für $r_{h,abs}/r_{h,diff}$ (Einzelheiten siehe Abschn. 3.1.2.2).



a) Kapillarer Flüssigkeitstransport



b) Diffusion

Bild C13: Modell realer Betonporen.

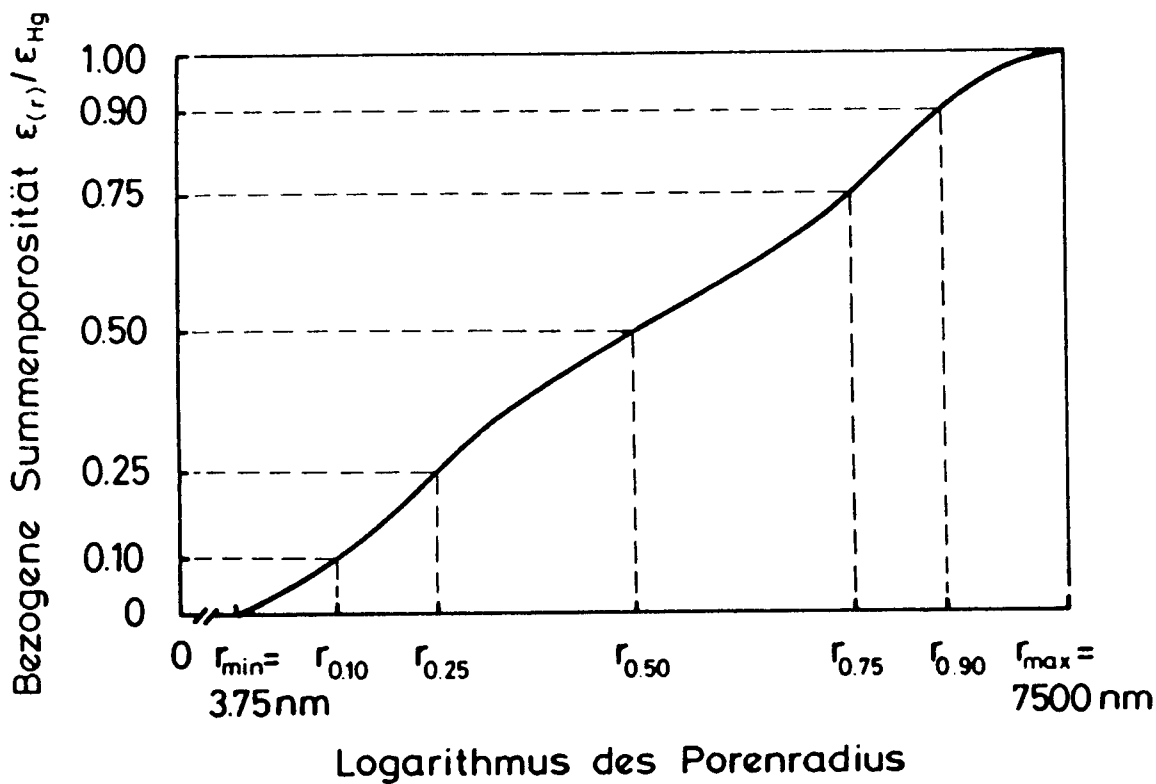


Bild C16: Bestimmung der Fraktalradien aus der Darstellung der integralen Porenradienverteilung.

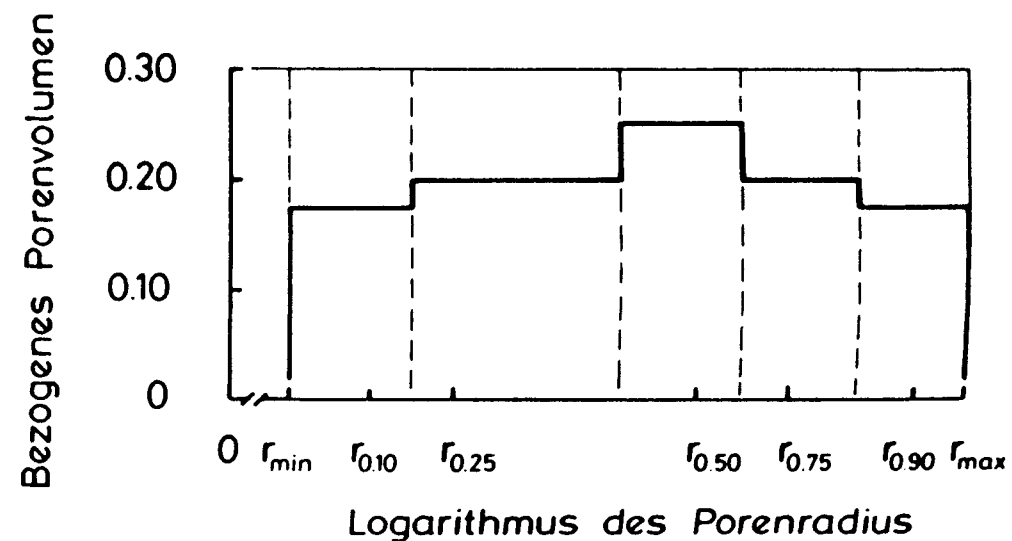
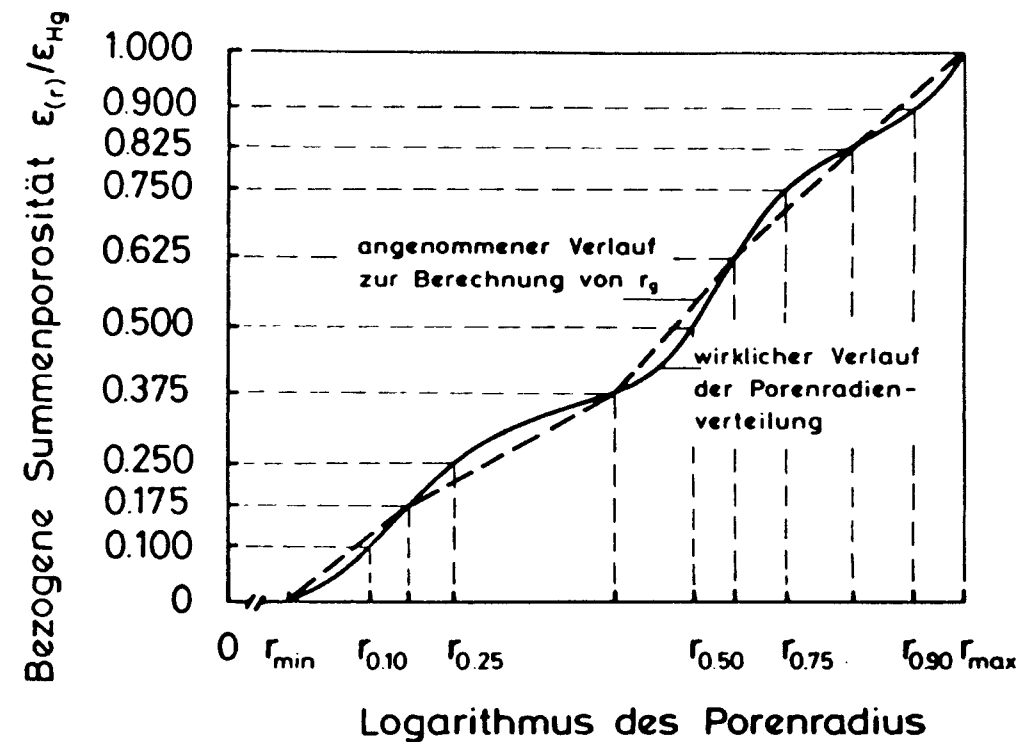


Bild C17: Bestimmung des gewichteten mittleren Fraktalradiuses.

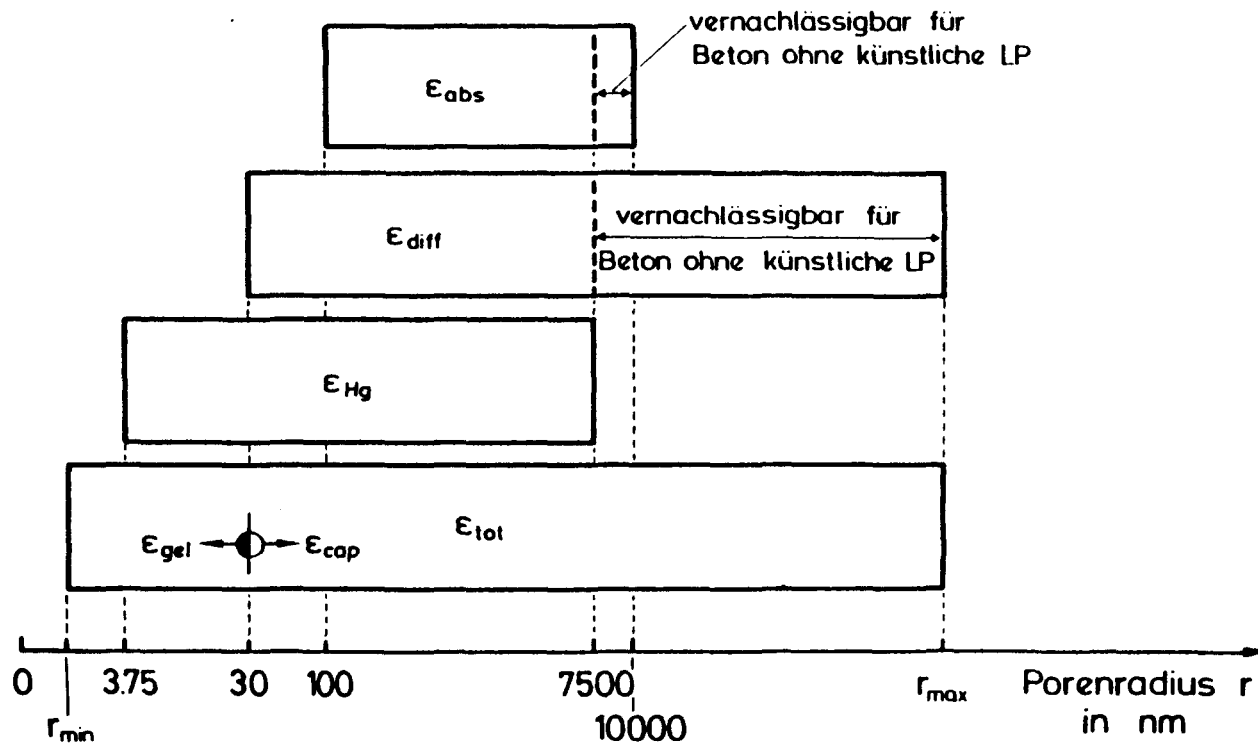


Bild C18: Zusammenhang zwischen der Teilporosität und des zugehörigen Porenradialenbereiches.

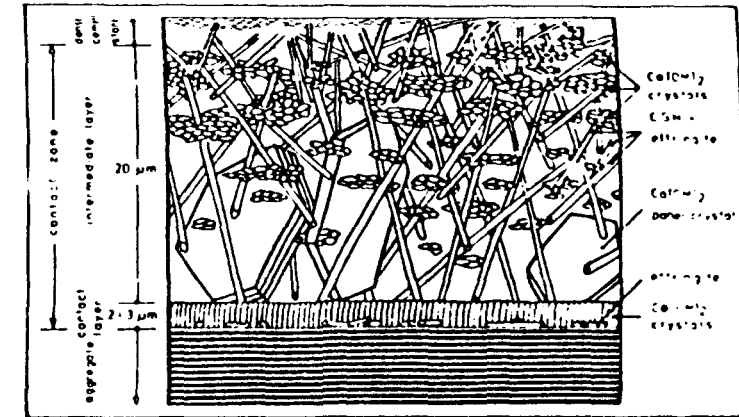


Bild C19: Modell der Verbundzone (aus [C35]).

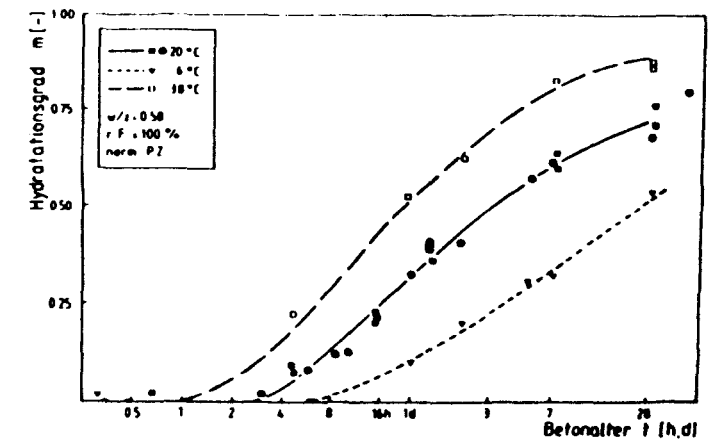
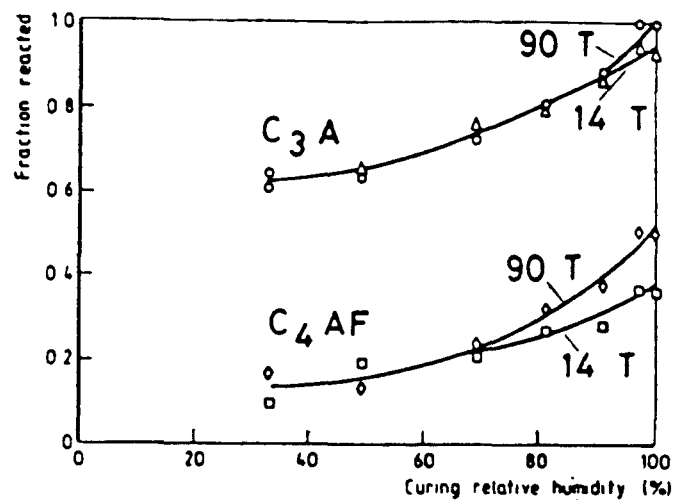
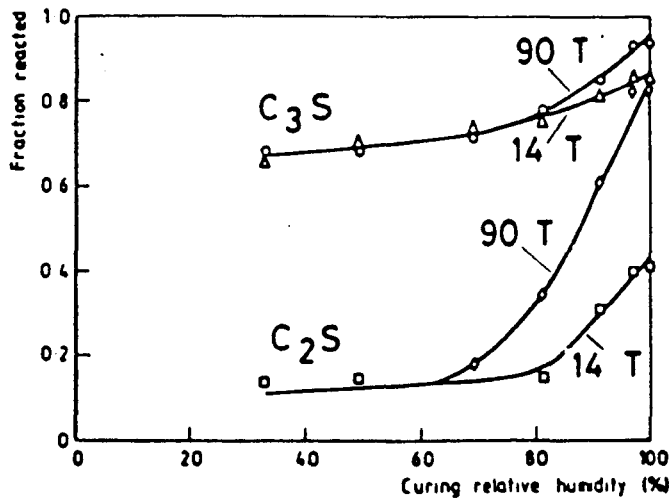


Bild C20: Einfluß der äußeren Erhärtungstemperatur auf den Hydratationsfortschritt nach [C40].

a)

Oxide (wt %)	Cement
SiO ₂	20.32
Fe ₂ O ₃	2.36
Al ₂ O ₃	5.47
CaO	64.00
MgO	2.30
SO ₃	2.80
Others	1.59
Loss on ignition	1.06
Density (kg/m ³)	3160
Specific surface (m ² /kg)	320

b)



c)

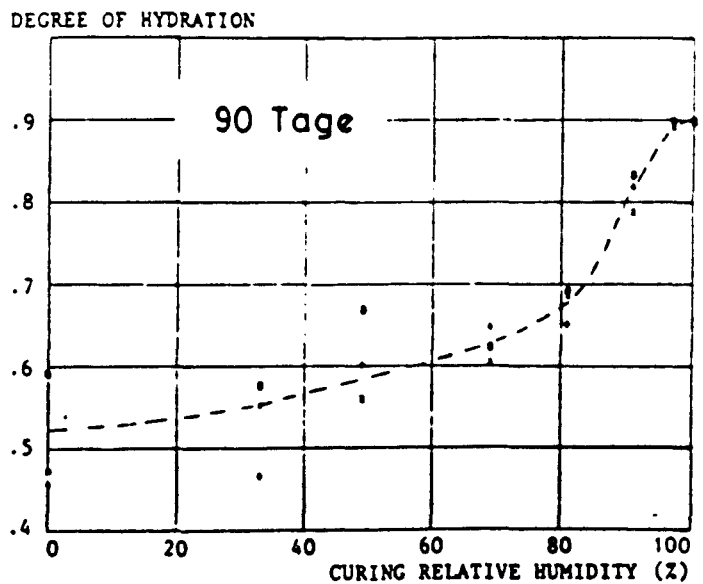
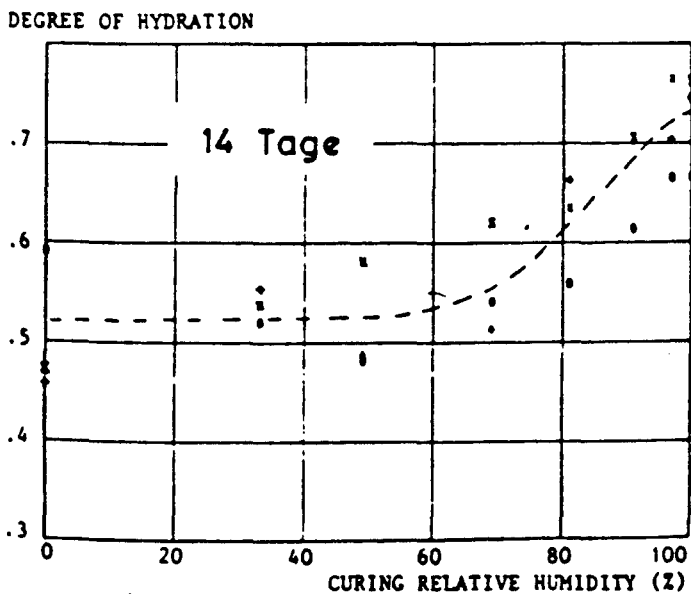


Bild C21: Einfluß der Umgebungsfeuchte auf den Hydratationsgrad im Alter von 14 und 90 Tagen Hydrationsdauer (reine Zementsteinpaste).

- a) Zementzusammensetzung
- b) Hydratationsgrad der einzelnen Klinkerphasen.
- c) Hydratationsgrad des Zementes
(nach [C41, C42])

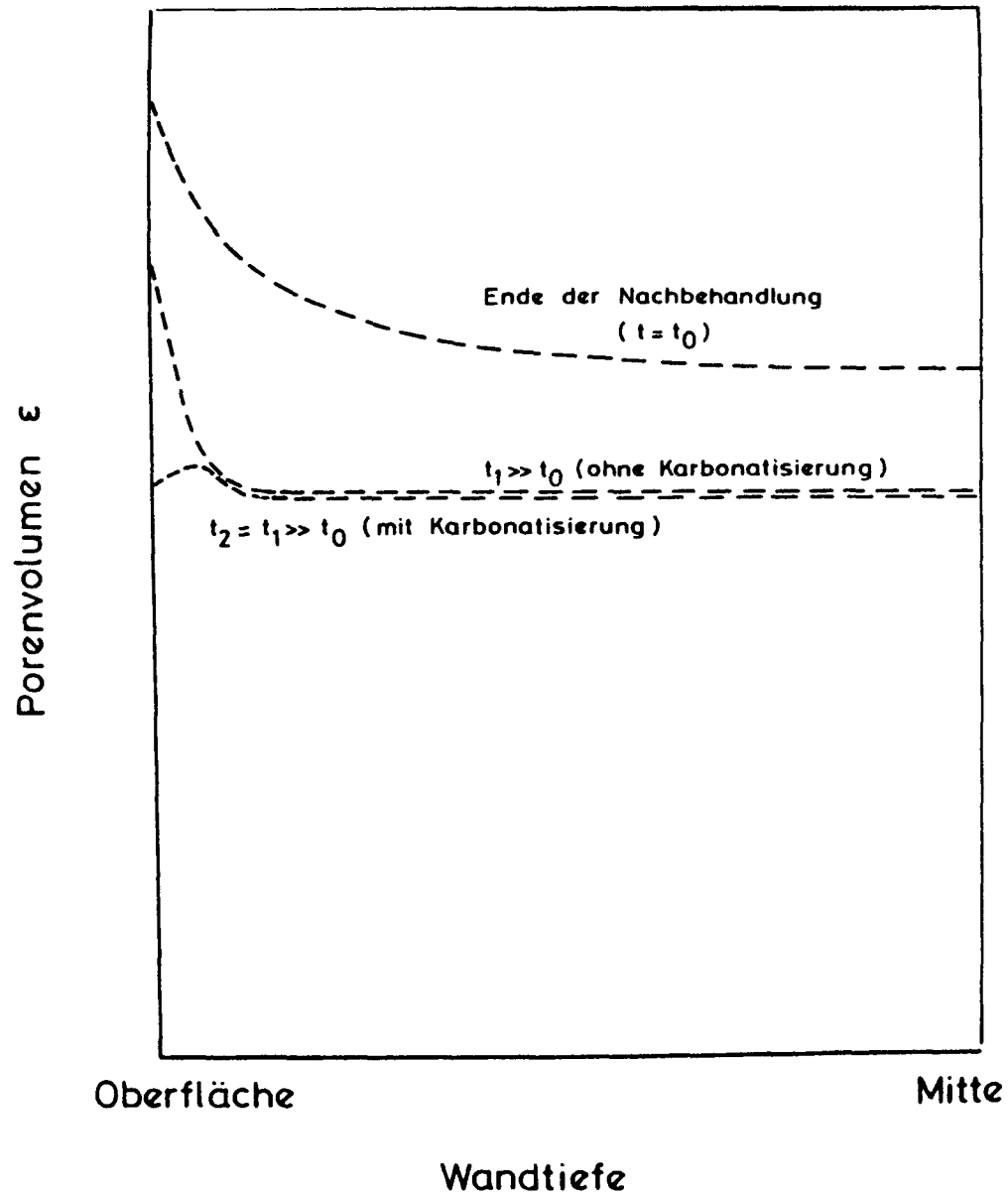


Bild C22: Schematische Darstellung des Einflusses der Witterung auf die Porosität des Betons.

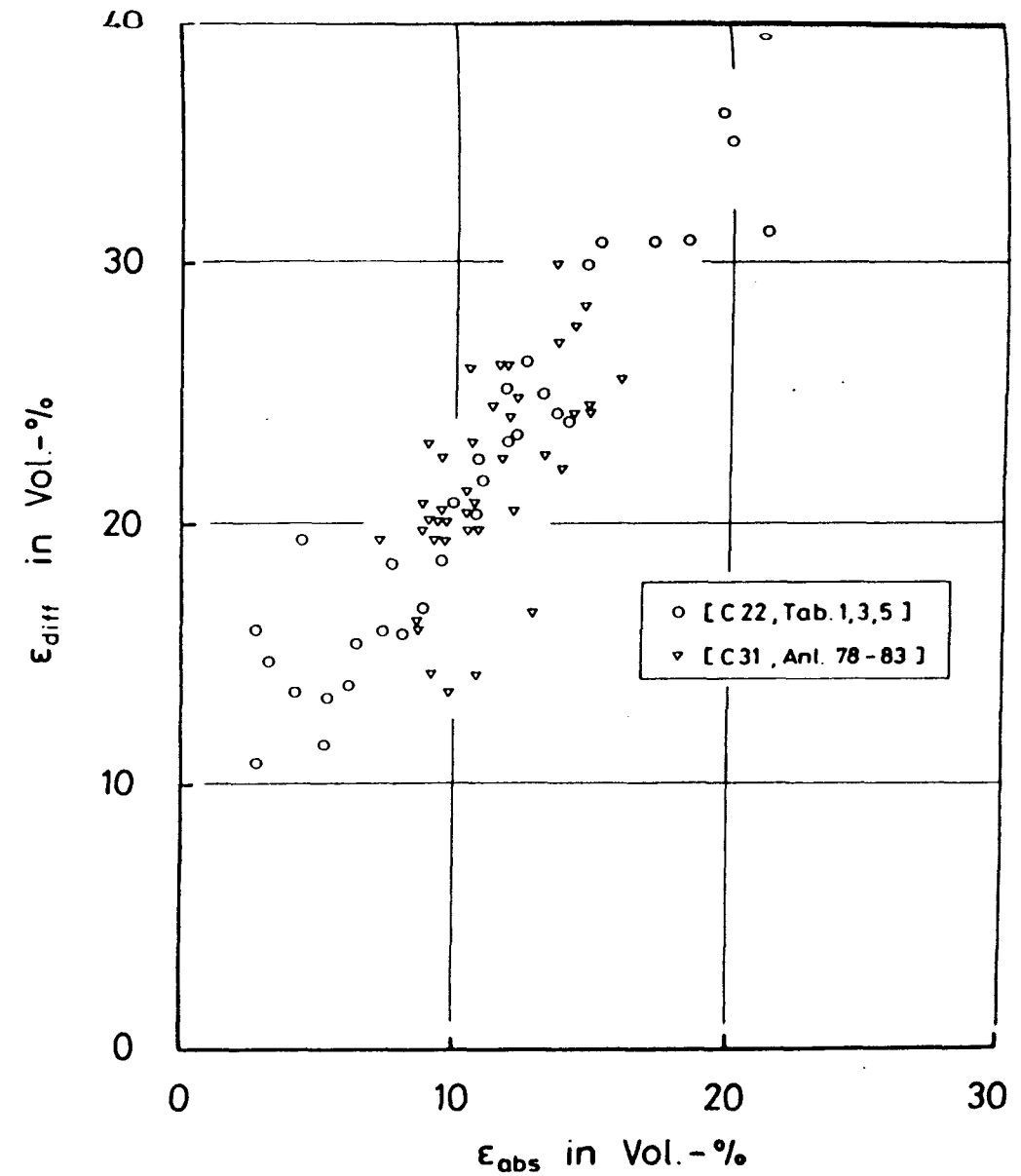


Bild C23: Abhängigkeit zwischen den transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} für in [C22] und [C31] veröffentlichte Porenradienverteilungen.

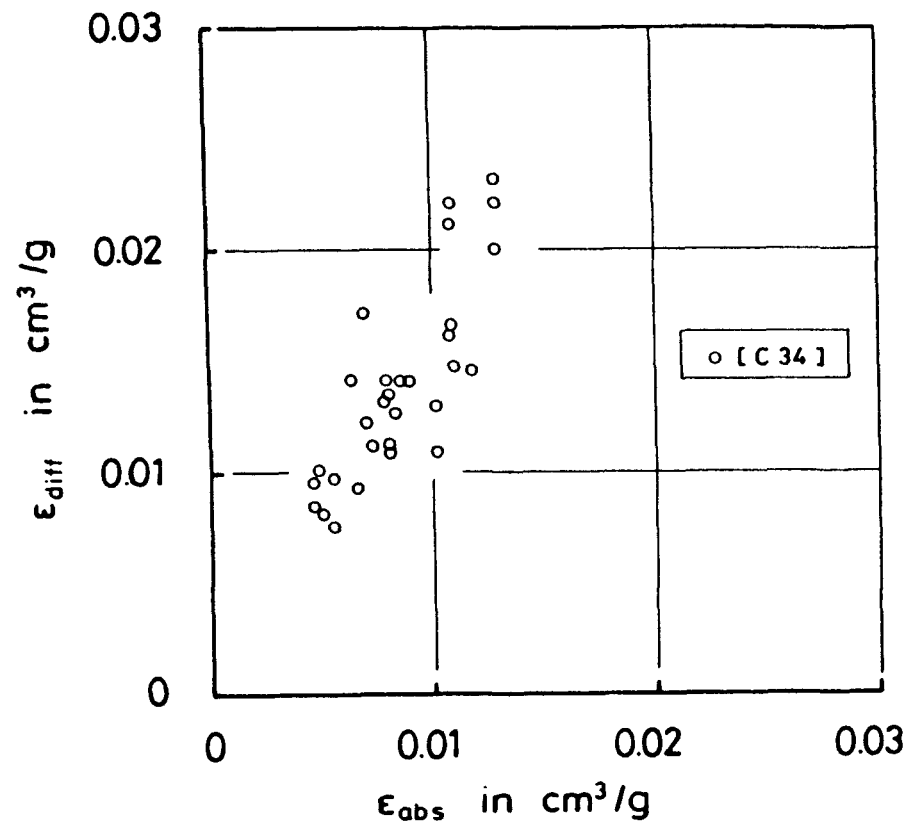


Bild C24: Abhängigkeit zwischen den transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} für in [C34] veröffentlichte Porenradialverteilungen.

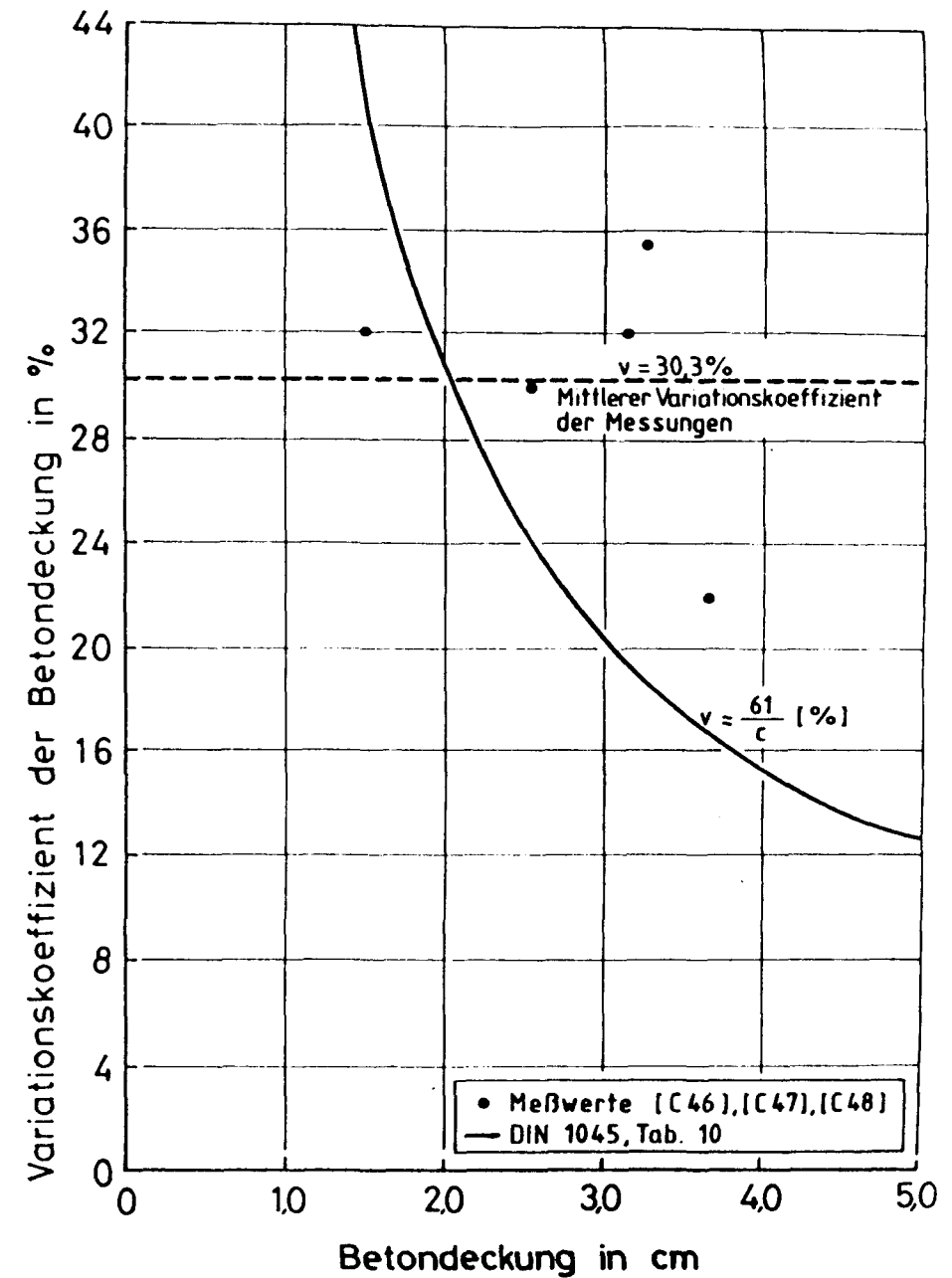


Bild C25: Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Dicke der Betondeckung von der Dicke der Betondeckung nach Tab. 10 von DIN 1045 und für am Bauwerk gemessene Dicken.

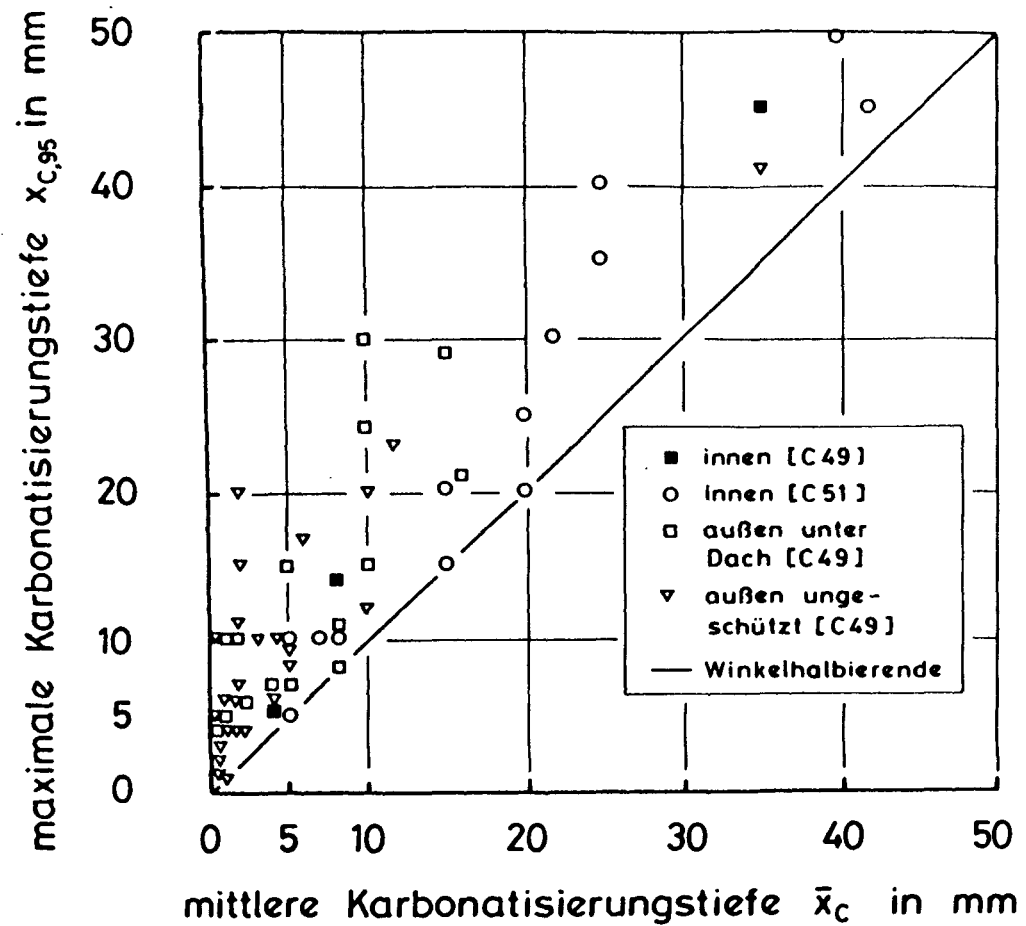


Bild C26: Mittlere und maximale Karbonatisierungstiefe nach [C49] und [C51] getrennt für verschiedene Lagerungsbedingungen (PZ gebundene Betone).

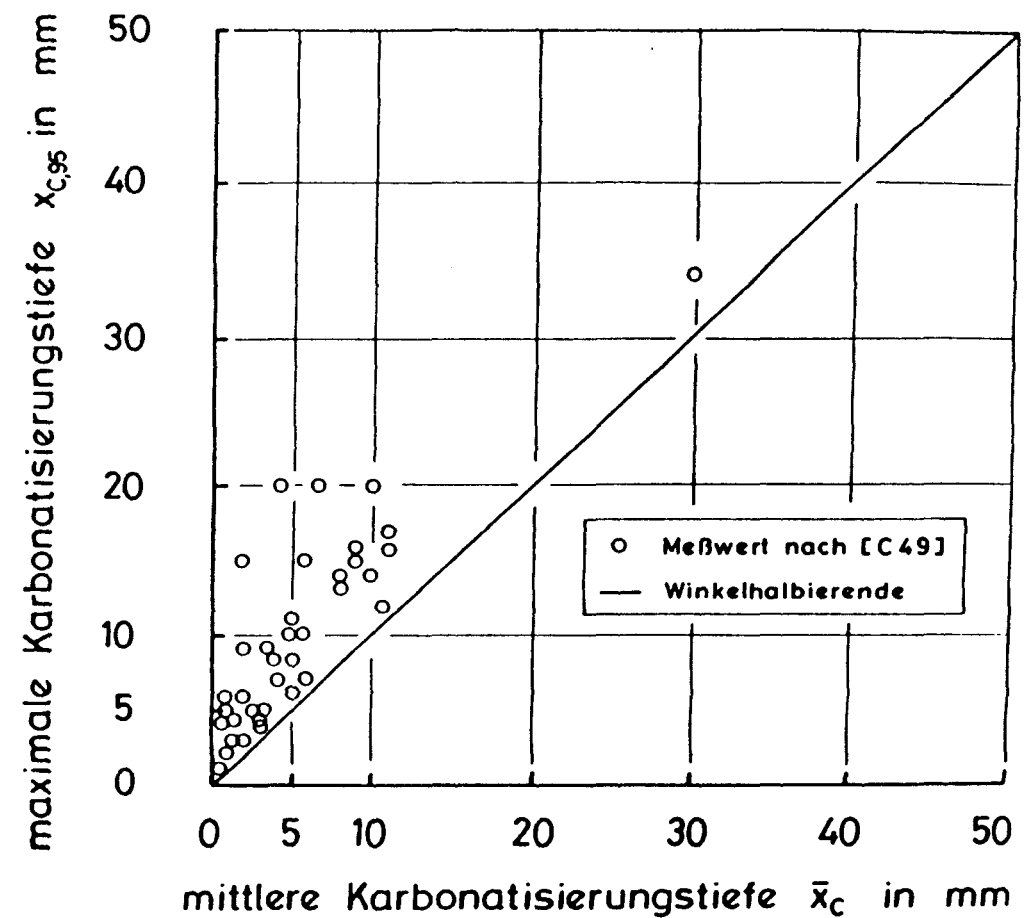


Bild C27: Mittlere und maximale Karbonatisierungstiefe nach [C49] (HOZ und EPZ gebundene Betone).

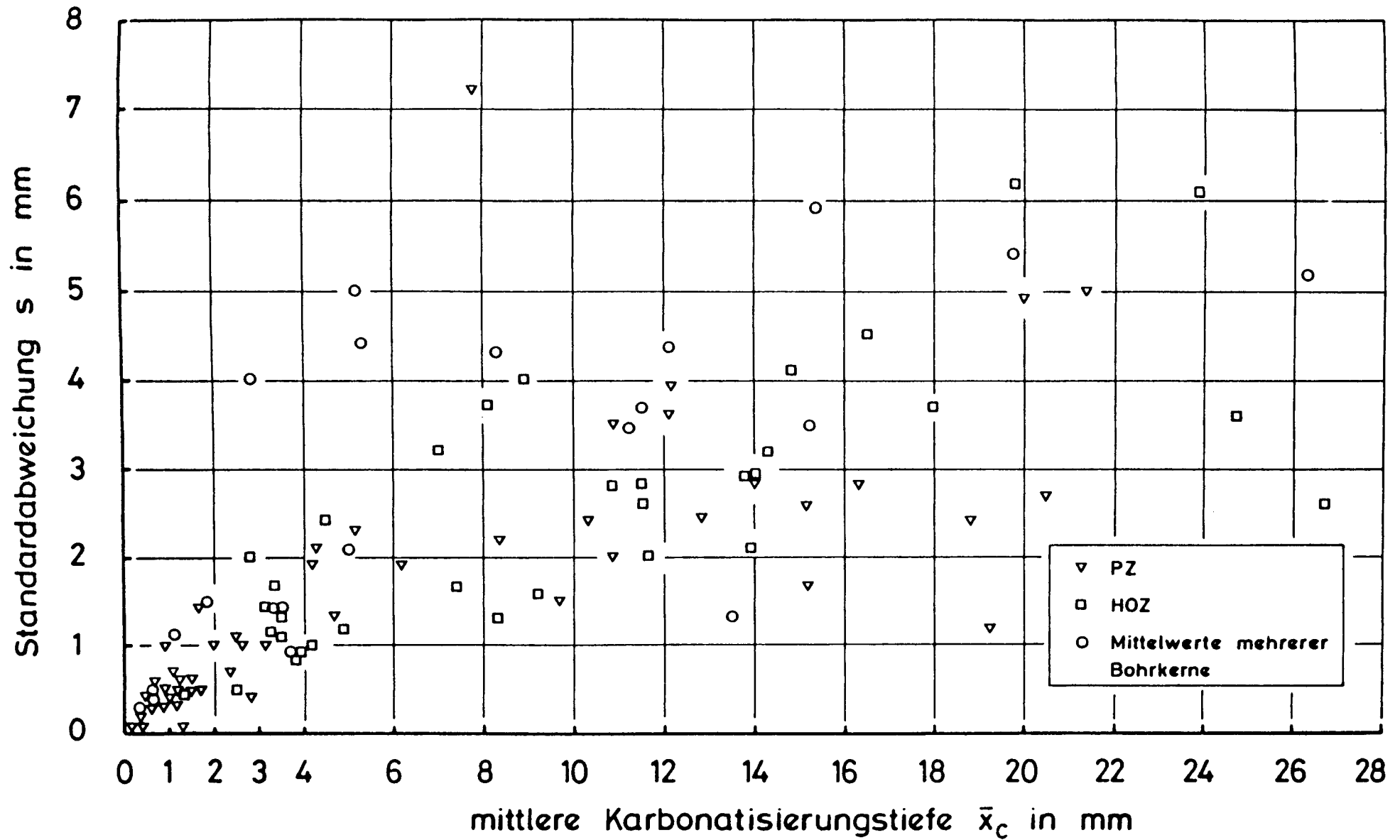


Bild C28: Mittlere Karbonatisierungstiefe und zugehörige Standardabweichung nach [C50].

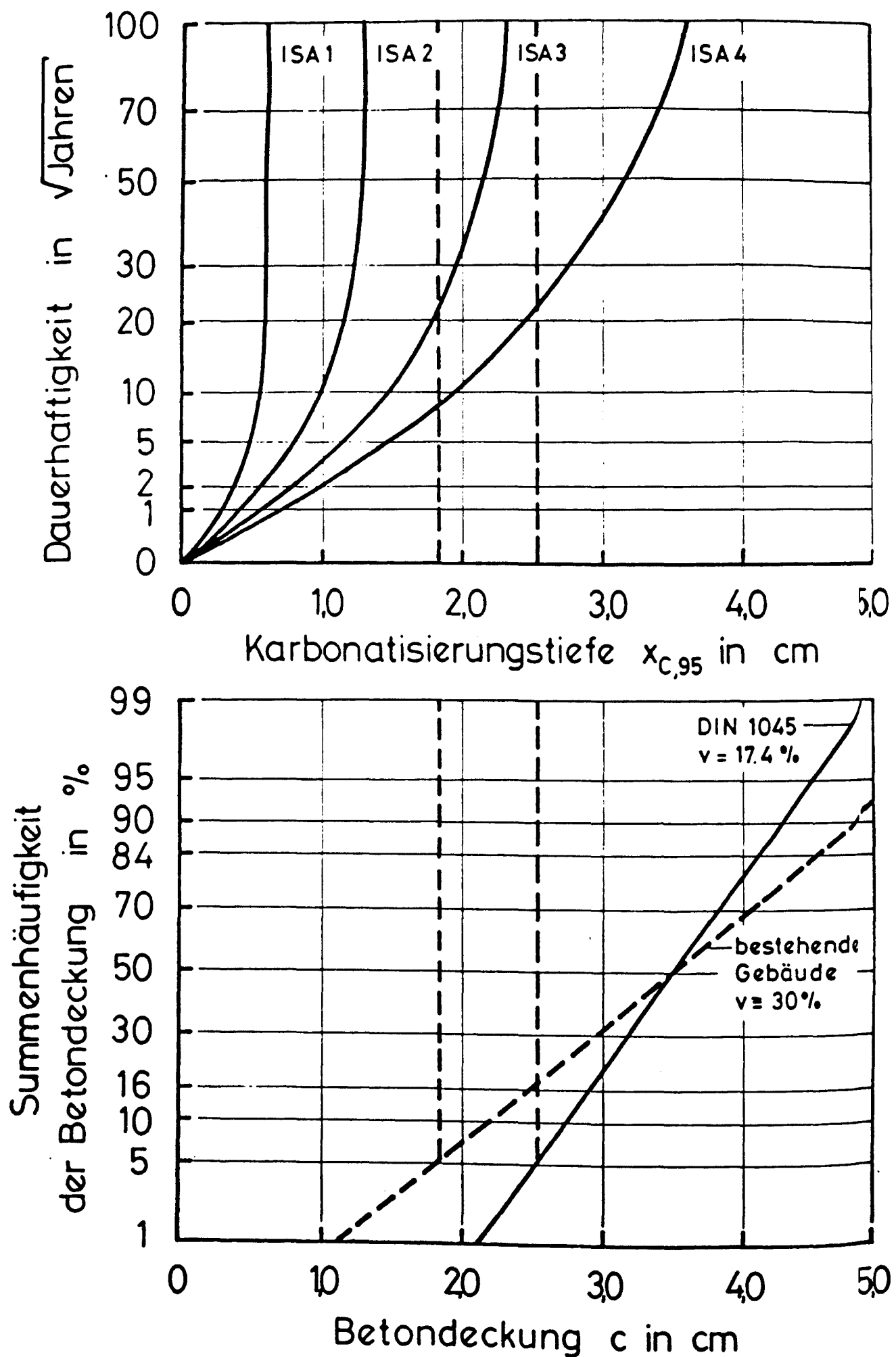


Bild C29: Schematische Darstellung des vorläufigen Bemessungsdiagramms der Betondauerhaftigkeit.

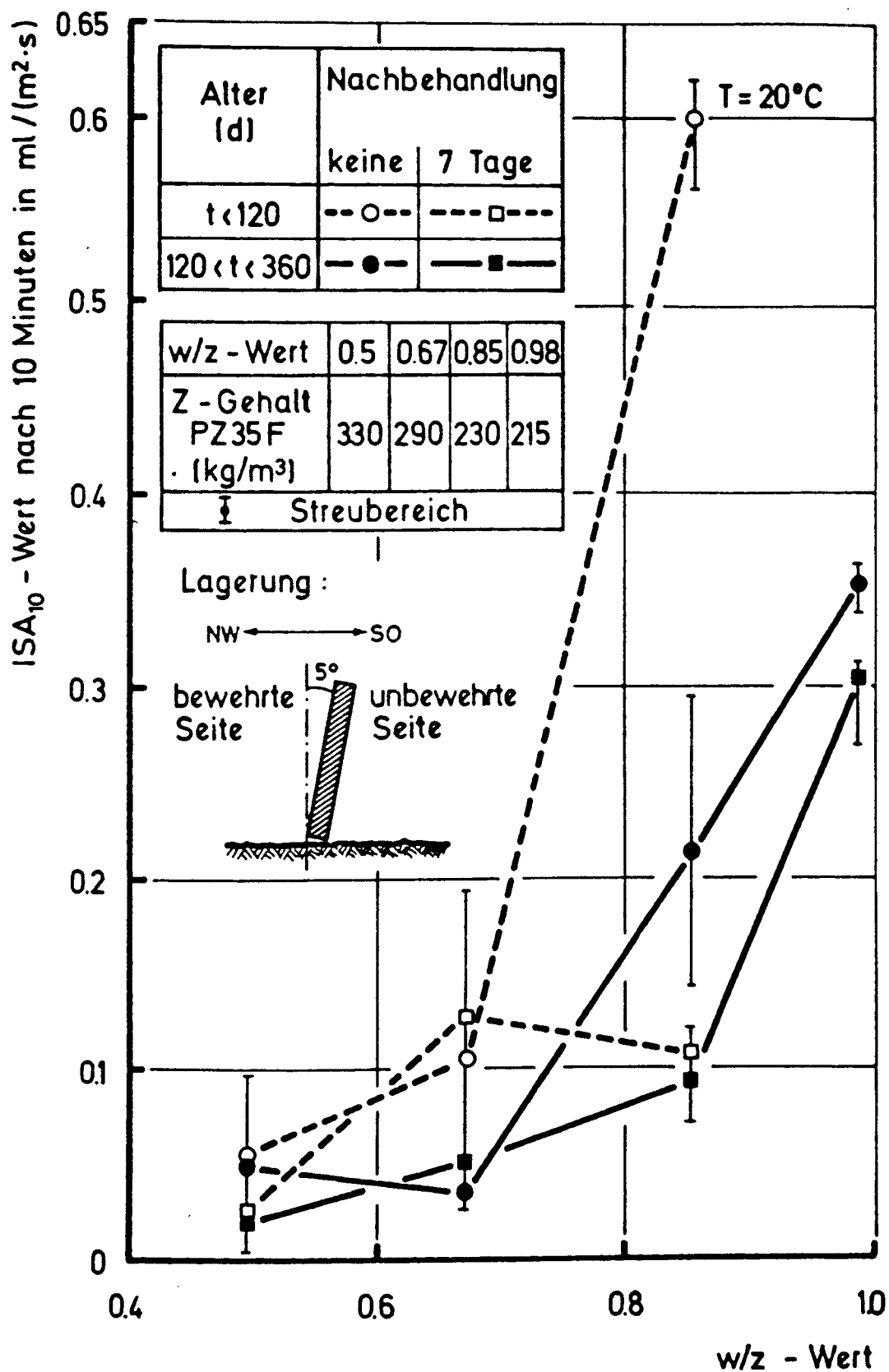


Bild C30: Abhängigkeit des ISA₁₀ - Wertes vom w/z - Wert für verschiedene Nachbehandlungsarten und Betonalter.

D. VERSUCHSERGEBNISSE UND DEREN INTERPRETATION

1. ÜBERBLICK ÜBER DIE AUSWERTUNG

Entsprechend den Forschungszielen (s. Abschn. 1, Berichtsteil C) erfolgt die Auswertung der Versuche und die Interpretation der Ergebnisse in folgender Reihenfolge:

1. Porenradienverteilungen (Abschn. D2)
2. Laboruntersuchungen zur Dichtigkeit (Abschn. D3)
3. Am Bauwerksbeton durchgeführte Absorptionsmessungen (Abschn. D4)
4. Verifikation der Beziehungen zwischen Porosität und Dichtigkeit sowie zwischen Diffusions- und Absorptionskoeffizient (Abschn. D5)
5. a) Quantifizierung der Basisvariablen des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells nach Abschn. C6 (Abschn. D6)
b) Anwendung des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells auf die hier untersuchten alten Betone (Abschn. D6)

Die Auswertung bezieht sich auf folgende Versuchskörper:

- Wände A - D,
- "alte Betone",
- Kleinkörper die einer künstlichen Bewitterung ausgesetzt waren.

In den Bildern D1 bis D3 sind die jeweils variierten Parameter dargestellt. In dieser Reihenfolge wird ihr Einfluß diskutiert. Die in den folgenden Bildern benutzte Bezeichnung "7 Tage unter feuchten Tüchern und Folie nachbehandelt" steht vereinfachend für die hier ausgeführten Arten der Nachbehandlung.

2. AUSWERTUNG DER PORENRADIENVERTEILUNGEN

2.1 Umfang der Auswertungen

Die wandtiefenabhängige, zeitliche Veränderung der Porenradienverteilung wird in Abhängigkeit folgender Parameter an Hand der Kennwerte der Fraktalradien und der transportrelevanten Porenkennwerte untersucht:

- Lagerungsbedingungen (Abschnitt 2.3)

- Wände A und B:
(Abschnitt 2.3.1) Direkter Vergleich der im Labor und im Freien aufgestellten Wände bis zu einem Betonalter von ca. 3 Jahren.
- Versuchshaus 1, Beckum:
(Abschnitt 2.3.2) Direkter Vergleich zwischen der Wandaußen-
seite (ungeschützt im Freien) und der Wand-
innenseite (im Freien unter Dach).
- Kleinkörper künstl. Bewitterung: Vergleich der Entwicklung der Poren-
(Abschnitt 2.3.3) radienverteilung infolge künstlicher Bewitte-
rung mit jener bei natürlicher Witterung.

- Nachbehandlung (Abschnitt 2.4)

- Wände A - D:
(Abschnitt 2.4.1) Vergleich der unterschiedlich nachbehandelten
Wandhälften zur Feststellung der Wirksamkeit
einer Nachbehandlung auf die Ausgangsporenra-
dienverteilung ($t = 7$ Tage) und das unter-
schiedliche Zeitverhalten.

- Betonzusammensetzung (Abschnitt 2.5)

1.) w/z-Wert (Abschnitt 2.5.1)

- Wände A und B: Feststellung des Einflusses des w/z-Wertes
auf die anfänglich vorhandene Porosität und
das dadurch bedingte unterschiedliche Zeit-
verhalten in der Veränderung der Porenradien-
verteilung.

- Beckum HS2 und HS4: Feststellung des Einflusses des w/z-Wertes auf die Porenradienverteilung älteren Betons.
- Kleinkörper künstl. Bewitterung: Feststellung des Einflusses des w/z-Wertes auf die Veränderung der Porenradienverteilung unter der Einwirkung eines künstlichen Klimas.

2.) Zementart (Abschnitt 2.5.2)

- Versuchshaus 1 und 4, Beckum: Einfluß der Zementarten PZ 275 und HOZ 275 auf die Porenradienverteilung von ca. 25 Jahre alten Beton.
- Versuchshaus 3 und 4, Beckum: Feststellung des Einflusses der Zementarten HOZ 275 und HOZ 375 auf die Porenradienverteilung.

3.) Sieblinie (Abschnitt 2.5.3)

- Wände B und C/D: Vergleich von Mörtel- und Betonverhalten bis zu einem Betonalter von ca. 3 Jahren.
- Kleinkörper künstl. Bewitterung: Feststellung des Einflusses der Sieblinie auf die Veränderung der Porenradienverteilung unter der Einwirkung eines künstlichen Klimas.

- Betonierdatum (Abschnitt 2.6)

- Wand C und D: Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Porenradienverteilung von Wänden gleicher Zusammensetzung, die an unterschiedlichen Tagen betoniert wurden.

Darüberhinaus wird im Abschnitt 2.7 der Einfluß der versuchsvorbereitenden Trocknungsart erläutert. Auf den Einfluß von Schwankungen in der Zusammensetzung gleicher Mischungen wird im Abschnitt 2.3 eingegangen.

Die zeitliche Veränderung der Menge und die altersabhängige Umverteilung des bei einem bestimmten Druck in eine Probe einpreßbaren Quecksilbervolumens auf andere Druckbereiche (Porenradialbereiche) soll dazu dienen, daß Ausmaß und die Geschwindigkeit anzuzeigen, mit der in Abhängigkeit beton-technologischer und klimatischer Bedingungen (Witterung) Hydratations- und Karbonatisierungsvorgänge ablaufen.

2.2 Auswirkung der Hydratation und Karbonatisierung auf die Fraktalradial

Vor der eigentlichen Versuchsauswertung wird in qualitativer Form auf die Auswirkungen der Hydratation und Karbonatisierung (Tab. D1; Basis Abschn. C5 und [D1]) auf die Fraktalradial eingegangen. Wie sich die Parameter auf die integrale Porenradialverteilung qualitativ auswirken, ist in den Bildern D4 bis D8 und Tab. D2 dargestellt.

Die folgende Auswertung besteht i. w. aus dem Vergleich der beobachteten Veränderungen der Fraktalradial, mit den erwarteten Veränderungen nach Tab. D2. Stimmt die beobachtete Veränderung mit einem der hier untersuchten Veränderungen überein, ist der zugehörige Parameter als Ursache dieser Veränderung anzusehen. Wie groß der Einfluß dieses Parameters ist, läßt sich aus der Größe der eingetretenen Veränderung ersehen. Wie die Auswertungen zeigen, lassen sich alle beobachteten Veränderungen auf die in Tab. D2 angeführten Parameter zurückführen.

2.3 Einfluß der Lagerungsbedingungen

2.3.1 Wand A und B

2.3.1.1 Fraktalradial

a) Mittlerer Fraktalradius r_g (Bilder D9 und D10)

In den Bildern D9 und D10 sind getrennt für die Wandpaare A und B die Ergebnisse der nachbehandelten und der nicht nachbehandelten Wandhälften dargestellt. Die verschiedenen Wandtiefen sind durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet.

Wandmitte

Betrachtet man die Wände A und B jeweils für sich, so ist der mittlere Radius r_g unabhängig von der Lagerungsart. Er ist über den gesamten hier betrachteten Zeitraum konstant und für die F- und L-Wände gleich groß. Die Abnahme der Fraktilradien $r_{0,10}$, $r_{0,25}$ und $r_{0,5}$ und die Zunahme des Fraktilradius $r_{0,75}$ infolge zunehmender Hydratation gleichen sich bei der Mittelwertbildung von r_g somit aus.

Oberflächennaher Beton

Die F-Wände weisen gegenüber den L-Wänden einen um, je nach sonstigen Bedingungen, 5 - 20 nm größeren mittleren Fraktilradius auf. Dieser Anfangsabstand bleibt über den gesamten hier betrachteten Zeitraum erhalten und gilt auch für die nachbehandelten Wandhälften. Da bei den F-Wänden im Vergleich zu den L-Wänden auf Grund der höheren Umgebungsfeuchte, größere Hydratationsgrade zu erwarten sind, kann dies nur auf die Zunahme des Radius $r_{0,75}$ zurückzuführen sein. Somit gibt es signifikante Unterschiede zwischen der Hydratation des oberflächennahen Betons und desjenigen in Wandmitte.

Die Abhängigkeit der Porenradienverteilung von der Wandtiefe und vom Betonalter hat folgende Gründe:

- Die herstellungsbedingte unterschiedliche Verteilung der Zement- und Zuschlagmenge führt zu unterschiedlichen Hydratationsbedingungen (siehe Abschnitt C2).
- Die sich vorwiegend auf den Beton der Betondeckung auswirkenden äußeren Hydratationsbedingungen (Abfluß von Hydratationswärme an die Umgebung, Austrocknung) und Wechselwirkungen mit eindringenden Fluiden.

Neben den Lagerungsbedingungen beeinflusst die Betonqualität die zeitliche Entwicklung der Porenradien. Für Wandpaar A ergibt sich ein Anstieg des mittleren Fraktilradius r_g bis zu einem Alter von 400 Tagen, für Wandpaar B erfolgt dieser nur bis zu einem Alter von 90 Tagen. Der Anstieg ist in der Tiefe 0 - 10 mm ausgeprägter als in der Tiefe 10 - 20 mm. Der sich daran anschließende Abfall von r_g ist für die Tiefe 0 - 10 mm der Karbonatisierung zuzuschreiben (siehe Tab. D2). Somit liegt r_g im Alter von 1000 Tagen für die Tiefe 10 - 20 mm auf einem höheren Niveau als nach 7 Tagen; für die Tiefe 0 - 10 mm dagegen auf einem niedrigeren Niveau.

Im Laborklima ist die Karbonatisierung stärker als im Freien. Deshalb liegt im Alter von 1000 Tagen der mittlere Fraktilradius der Tiefe 0 - 10 mm bei den L-Wänden unter dem Wert für die Wandmitte, bei den F-Wänden dagegen auf einem Niveau, das zwischen demjenigen der Tiefe 10 - 20 mm und dem der Wandmitte liegt.

Die Versuchsergebnisse bestätigen außerdem den in Tab. D2 festgestellten Einfluß der Wandtiefe, wonach sich mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche der mittlere Fraktilradius r_g verringert.

b) Fraktilradien r_i (Bilder D11 bis D13)

In getrennten Darstellungen für die Wände A (Bild D11) und B (Bild D12), sind jeweils die Meßwerte gegeneinander aufgetragen, für die alle übrigen Parameter gleich sind (gleiche Nachbehandlung, gleiches Alter, gleiche Wandtiefe).

Es soll ermittelt werden, auf welche Radienbereiche sich die relativen Porenvolumenanteile umverteilen. Eine Umverteilung wird entweder möglich durch Neubildung von Poren bzw. durch Entstehung von Mikrorissen oder aber dadurch, daß bestehende Poren bzw. Risse im Laufe der Zeit teilweise oder ganz zuwachsen (Nachhydratation oder Karbonatisierung).

Von a) her bekannt ist, daß die porenradienverändernden Vorgänge in Abhängigkeit der Wandtiefe unterschiedlich ablaufen, daß bereits im Alter von 7 Tagen die F-Wände in den Tiefen 0 - 10 mm und 10 - 20 mm einen größeren mittleren Fraktilradius aufweisen als die L-Wände und daß die Geschwindigkeit von porenradienverändernden Vorgängen von den äußeren Randbedingungen (Lagerungsbedingungen) mitbestimmt werden.

Dies spiegelt sich auch in Bild D13 wider. Die Werte für die Proben der Wandmitte liegen für Wand B (untere Bildhälfte), auf oder nahe bei der Winkelhalbierenden. Für alle übrigen Tiefen liegen nahezu alle Werte über der Winkelhalbierenden, so daß unter sonst gleichen Bedingungen, die F-Wände größere mittlere Fraktilradien aufweisen als die L-Wände. Die weitere Betrachtung der einzelnen Fraktilradien r_i soll zwei Fragen klären:

1. Gilt für alle Fraktilradien, daß sich in Wandmitte kein Einfluß der Lagerungsbedingungen nachweisen läßt?

2. Auf welche Porengrößen (Radienbereiche) wirken sich die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen in den Wandtiefen 0 - 10 mm und 10 - 20 mm vorwiegend aus und welchen Einfluß haben dabei die äußeren Bedingungen?

Zu 1.: In der Wandmitte sind die Fraktilradien $r_{0,10}$, $r_{0,25}$ und $r_{0,50}$ von den Lagerungsbedingungen unabhängig. Für den Zeitraum von ca. 1000 Tagen sind somit die Beanspruchungen infolge natürlicher Witterung und Laborklima 20/65 nicht unterschiedlich genug, um in der Wandmitte signifikant unterschiedliche Porenradienverteilungen zu bewirken.

Zu 2.: Der Einfluß der äußeren Bedingungen ergibt folgende Zusammenhänge (vergl. Tab. D2):

- In Wandmitte liegen für alle Fraktilradien die Werte auf oder nahe bei der Winkelhalbierenden, so daß keine Unterschiede zwischen der F- und L-Lagerung festzustellen sind.
- Entsprechend den besseren Hydratationsbedingungen der im Freien aufgestellten Wände sind in der Regel deren Fraktilradien $r_{0,10}$, $r_{0,25}$ und $r_{0,50}$ in der Wandtiefe 0 - 20 mm kleiner, als die zugehörigen Werte der L-Wände. Der Fraktilradius $r_{0,75}$ der F-Wände der Wandtiefe 0 - 20 mm ist größer als derjenige der L-Wände.
- In der Tiefe 0 - 10 mm kommt der Einfluß der Karbonatisierung zum tragen, so daß für Wandpaar B der Fraktilradius $r_{0,75}$ der Tiefe 10 - 20 mm weiter von der Winkelhalbierenden entfernt ist als derjenige der Tiefe 0 - 10 mm.

Zusammenfassung: Für ein Alter von weniger als einem Jahr, weist der Beton der Betondeckung eine gröbere Porenradienverteilung auf, als der Beton der Wandmitte, da in der Betondeckung relativ gleich große Prozentanteile der Porosität auf größere Poren entfallen. Infolge Karbonatisierung gleichen sich die Porenradienverteilungen einander an. Außerdem ist der oberflächen-nahe Beton der F-Wände besser hydratisiert als jener der L-Wände.

2.3.1.2 Transportrelevante Porenkennwerte (Bilder D14 und D15)

In Bild D14 werden die transportrelevanten Porenkennwerte von Wandpaar A einander gegenübergestellt. Bild D15 gilt entsprechend für das Wandpaar B.

Betrachtet werden zunächst die Ergebnisse des 7 Tage alten Betons. Obwohl die beiden unterschiedlich gelagerten Wände gleichzeitig hergestellt wurden und der Beton gleichmäßig auf beide Wände verteilt wurde, ergeben sich zwischen ihnen Unterschiede, die nicht dem Einfluß der Lagerungsbedingungen zugeschrieben werden können. Während $\varepsilon_{\text{diff}}$ der F-Wände kleiner ist als bei den L-Wänden ist es für die übrigen drei Kennwerte umgekehrt.

Da $\varepsilon_{\text{diff}}$ und ε_{cap} identisch sind, bedeutet dies, daß bereits zu diesem Alter die F-Wände besser hydratisiert sind als die L-Wände.

Die Abnahme von $\varepsilon_{\text{diff}}$ ist mit einer Zunahme des hydraulischen Radius $r_{h,\text{diff}}$ verbunden (siehe Bild D14 und D15). Da

$$r_{h,\text{diff}} = \frac{\varepsilon_{\text{diff}}}{\phi_{\text{diff}}}, \quad (\text{D1})$$

ist dies nur durch gleichzeitige Verringerung der inneren Oberfläche möglich. $\varepsilon_{\text{diff}}$ muß somit mit zunehmender Hydratation mehr grobe Poren enthalten, bzw. die Poren mit kleineren Radien wachsen soweit zu, daß sie in den Bereich $r < 30 \text{ nm}$ fallen. Das letztere wird dadurch bestätigt, daß sich ε_{abs} nur geringfügig verändert bzw. für F- und L-Wände gleich groß ist und somit nicht von der Hydratation beeinflusst wird. Eine Hydratation bewirkt somit in erster Linie den Abbau von Poren des Radienbereiches $30 \text{ nm} < r < 100 \text{ nm}$ (Reduktion des Porenanteils $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{diff}} - \varepsilon_{\text{abs}}$) und eine Anhebung von $r_{h,\text{diff}}$.

Da ε_{abs} nahezu konstant bleibt und $r_{h,\text{abs}}$ zunimmt, folgt daraus eine Abnahme der inneren Oberfläche der Verbundporen. Welcher Vorgang für solch eine Porositätsveränderung verantwortlich ist, ist nicht bekannt.

Eine eindeutige zeitliche Entwicklung ist, bis auf $\varepsilon_{\text{diff}}$ der F-Wände, bei beiden Lagerungsarten nicht erkennbar. Dies ist dem Einfluß der übrigen Parameter und der Karbonatisierung zuzuschreiben.

2.3.2 Versuchshaus 1 aus Beckum

2.3.2.1 Fraktilradien

a) Mittlerer Fraktilradius (Bild D17, untere Hälfte)

Aufgetragen ist über der Wandtiefe der mittlere Fraktilradius r_g (Tiefe 0 cm entspricht der äußeren; die Tiefe 15 cm der inneren Oberfläche der Westwand). Näherungsweise wird davon ausgegangen, daß in allen Tiefen der gleiche Hydratationsgrad erreicht ist.

Bis auf die beiden Oberflächenzonen von 10 mm Dicke, liegen für die übrigen Tiefen die Werte r_g zwischen 150 und 200 nm. Sie sind ca. dreimal größer als für die Wände A und B, obwohl der Beton von Haus 1 mit einem w/z-Wert von 0,6 und einer Ausschalfrist von 5 Tagen mit dem Beton dieser Wände vergleichbar ist.

Der geringere r_g -Wert der Außenschichten ist Folge der Karbonatisierung. In [D2] wurde bei Untersuchungen der Nordwand im Alter von ca. 20 Jahren festgestellt, daß sich auch in den Tiefen Karbonate nachweisen lassen, die größer sind als die mit Phenolphthalein gemessene Karbonatisierung. Entsprechend den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ist dies innen in stärkeren Ausmaß als außen der Fall. Für alle übrigen Tiefen ist ein Einfluß der Lagerungsbedingungen nicht feststellbar. Die Schwankungen zwischen den beiden Versuchen einer Tiefe sind z.T. größer als die Unterschiede zwischen zwei Tiefen.

Mit zunehmendem Alter (Haus 1 ist ca. neunmal älter als die Wände A und B im Alter von 1000 Tagen) kommt es offenbar zu einer Vergröberung der Porenradienverteilung in allen Tiefen. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, daß nicht bereits der damals benutzte Portlandzement sich von heutigem so stark unterscheidet, daß daraus unterschiedliche Porenradienverteilungen entstanden. Da Porenradienverteilungen des Versuchshauses für Alter kleiner 1000 Tage nicht vorliegen, läßt sich dies nicht feststellen.

b) Fraktilradien r_i (Bild D16 und D17)

Auch für die Fraktilradien r_i gilt, daß innen in der Tiefe 0 - 10 mm die Werte am kleinsten sind, da dort die stärkste Karbonatisierung stattgefunden hat (siehe Tab. D2). Die Werte der Fraktilradien $r_{0,10}$ und $r_{0,25}$ steigen auf beiden Wandseiten von der Tiefe 0 - 10 mm zur Tiefe 10 - 20 mm hin an, um dann ausgehend von diesen Maximalwerten abzufallen und in der Wandmitte ein Minimum anzunehmen. Für die Radien $r_{0,50}$ und $r_{0,75}$ ergibt sich dagegen eine andere Abhängigkeit von der Wandtiefe. Sie sind oberflächennah am kleinsten und steigen zur Mitte hin stetig an. Entsprechend den unterschiedlichen Karbonatisierungsbedingungen erfolgt dies unsymmetrisch für die innere und äußere Wandhälfte. Aus dieser unterschiedlichen Abhängigkeit von der Wandtiefe erklärt sich der annähernd konstante Verlauf von r_g .

2.3.2.2 Transportrelevante Porenkennwerte (Bild D18)

Bei Betrachtung der transportrelevanten Porenkennwerte fällt im Vergleich zu den Wänden A und B folgendes auf:

1. Die Porenanteile ε_{abs} und ε_{diff} sind über die Wandtiefe gleichmäßig verteilt: lagerungs- und herstellungsbedingte Unterschiede haben sich ausgeglichen (Ausnahme siehe unten). Die hydraulischen Radien verhalten sich in ihrer Abhängigkeit von der Wandtiefe wie die Fraktilradien $r_{0,50}$ und $r_{0,75}$, einschließlich der dort beobachteten Schiefe.
2. Da ε_{abs} nur geringfügig kleiner als ε_{diff} ist, sind kaum noch eigentliche Kapillarporen vorhanden. Der Einfluß der Karbonatisierung läßt sich am deutlichsten für die Wandinnenseite nachweisen (Porenanteile ε_{abs} und ε_{diff} deutlich kleiner als für die übrigen Tiefen).

Im Vergleich zu den Wänden A und B im Alter von 1000 Tagen ergibt sich für das ca. 9000 Tage alte Versuchshaus 1 eine Zunahme von ε_{abs} um den Faktor 3, während ε_{diff} ca. 1,5 - 2 mal größer ist (gilt jeweils nur für die Lagerung ungeschützt im Freien).

Der hydraulische Radius $r_{h,abs}$ ist für das Versuchshaus 1 und die Wände A und B ungefähr gleich groß. Dagegen ist beim Versuchshaus 1 der

hydraulische Radius $r_{h,diff}$ ca. doppelt so groß wie bei Wandpaar A (Folge des Fehlens eigentlicher Kapillarporen).

Insgesamt weist Haus 1 eine wesentlich gröbere Porenradienverteilung auf als die Wände A und B. Da diese Feststellung für alle Wandtiefen gilt, kann dies nicht nur Folge der Witterung sein. Vielmehr ist davon auszugehen, daß der Beton von Haus 1 zu allen Altern wesentlich poröser war, als jener der Wände A und B.

2.3.3 Kleinkörper der künstlichen Bewitterung zugehörig den Wänden A und B

2.3.3.1 Fraktilradien (Bilder D19 bis D21)

Dargestellt sind über der Tiefe der Probenentnahme die Fraktilradien in Abhängigkeit von den Bewitterungszyklen.

Bei Versuchsbeginn wiesen die Versuchskörper ein Alter von 400 Tagen Lagerung im unklimatisierten Keller auf. Auf Grund herstellungsbedingter Unterschiede ist ihr Beton trotz gleicher Zusammensetzung nicht mit jenem der Wände vergleichbar. Gründe dafür sind in der unterschiedlichen Verdichtung (Flaschenrüttler und Styroporeinlagen an den Schalungsflächen sowie andere Geometrie) sowie in der schlechteren Hydratation (auf Grund der geringeren Abmessungen schnelleres Austrocknen, Styroporummantelung ist nicht dampfdicht) zu suchen. Die Fraktilradien sind vor Beginn der Bewitterung größer als für die gleich alten L-Wände.

Alle Fraktilradien werden mit der Zyklenzahl kleiner, wobei nach 5000 Zyklen praktisch ein Endwert erreicht ist.

Anfängliche Unterschiede zwischen den Tiefen sind nach Ende der Bewitterung ausgeglichen. Die bis dahin entstandenen Größen der Fraktilradien stimmen nicht mit jenen der Wände A und B überein. Durch die hier gewählte Beanspruchung wird vielmehr eine Situation geschaffen, die mit einer

- besseren Nachhydratation
- geringeren Karbonatisierung

gegenüber den Wänden verbunden ist. Da auch der Fraktilradius $r_{0,75}$ abnimmt, liegen äußere Bedingungen vor, die sonst nur in Wandmitte herrschen (kein vollständiges Austrocknen auch der großen Verbundporen). Somit widersprechen sich die Beobachtungen infolge künstlicher und natürlicher Bewitterung. Die hier gewählte künstliche, zeitraffende Bewitterung stellt somit keine schärfere Beanspruchung als die F-Lagerung dar.

2.3.3.2 Transportrelevante Porenkennwerte (Bild D22 und D23)

Die für die Fraktilradien getroffenen Feststellungen werden durch die transportrelevanten Porenkennwerte bestätigt. Die kapillar wirksame Porosität nimmt mit der Zyklenzahl ab, und ist nach 8000 Zyklen $1/2$ bis $1/3$ so groß wie zu Beginn der Bewitterung. Dies steht nicht in Einklang mit Veränderungen infolge natürlicher Witterung. Eine Abhängigkeit von der Tiefe ist nicht festzustellen.

Die diffundierbare Porosität nimmt ebenfalls mit der Zyklenzahl ab. Während sich ε_{abs} um $8 - 10 \text{ cm}^3/\text{kg}$ verringert, beträgt die Abnahme für $\varepsilon_{\text{diff}}$ ca. $15 - 20 \text{ cm}^3/\text{kg}$. Dies bedeutet, daß die Poren mit $r > 100 \text{ nm}$ und jene des Radienbereiches $30 \text{ nm} \leq r \leq 100 \text{ nm}$ um denselben Betrag abnehmen. Eine Abhängigkeit von der Tiefe ist nicht zu erkennen.

Für den hydraulischen Radius $r_{h,\text{diff}}$ liegen infolge künstlicher Bewitterung erheblich kleinere Werte als infolge natürlicher Beanspruchung vor. Somit zeigen auch die transportrelevanten Porenkennwerte ein natürliches Verhalten nicht vergleichbares Zeitverhalten. Die hier gewählte zyklische Beanspruchung ist unbrauchbar, um eine Zeitraffung der dauerhaftigkeitsrelevanten Werte zu erzeugen.

2.4 Einfluß der Nachbehandlung

2.4.1 Wände A - D

2.4.1.1 Fraktilradien (Bilder D24 bis D32)

Dargestellt sind für die einzelnen Wände die Fraktilradien getrennt für die nachbehandelte und nicht nachbehandelte Wandhälfte der Wandtiefe 0 - 10 mm.

Betrachtet man zunächst die Werte im Alter von 7 Tagen (Ende der Nachbehandlung), so sind die Fraktilradien der nachbehandelten Wandhälften kleiner als die der nicht nachbehandelten Wandhälften. Besonders deutlich wird dies am mittleren Radius r_g (Bilder D24 bis D26) und dem Fraktilwert $r_{0,50}$ (Bilder D27 bis D32). Zusammen mit $r_{0,10}$ sind sie in Tab. D3 wiedergegeben. Bei r_g bewirkt die Nachbehandlung eine Reduktion um 30 %, bei $r_{0,50}$ eine solche um 45 %.

Betrachtet man die Größe von r_g und $r_{0,50}$, so liegt sie für die nachbehandelten Wandhälften mit Ausnahme des Wandpaars B in der Größenordnung von 30 nm. D.h., daß bei den Wänden A, C und D im Fall einer Nachbehandlung ≈ 50 % der mit dem Quecksilberdruckporosimeter ermittelbaren Porosität auf die transportwirksamen Kapillar- und Verbundporen entfällt. Bei den nicht nachbehandelten Wandhälften ist $r_{0,50}$ z.T. sehr viel größer als 30 nm, so daß für diese Betone mehr als 50 % der ermittelten Porosität als Kapillar- und Verbundporen vorliegen.

Ein Vergleich der einzelnen Wände bzw. Wandpaare zeigt, daß die Wirksamkeit einer Nachbehandlung von der Betonzusammensetzung abhängt. Für Wandpaar A ($w/z = 0,5$) bewirkt die Nachbehandlung eine Reduktion der Fraktilradien r_g und $r_{0,50}$ um 25 %, bei Wandpaar B ($w/z = 0,7$) dagegen eine Reduktion von 36 % und bei den Wänden C und D (ebenfalls $w/z = 0,7$, Mörtelwand) eine Reduktion von 50 %. Je schlechter die Betonqualität auf Grund der Betonzusammensetzung ist, desto effektiver ist die Nachbehandlung.

Der Radius $r_{0,10}$ wurde deshalb in Tab. D3 mit aufgenommen, weil er, im Gegensatz zu allen übrigen Fraktilradien, für alle Wände, ganz gleich ob nachbehandelt oder nicht und unabhängig von den Einflüssen der Lagerungsbe-

dingungen einen konstanten Wert von i. M. $r_{0,10} = 7,5$ nm aufweist. Es liegt die Vermutung nahe, daß dies für 7 Tage alte portlandzementgebundene Betone und Mörtel im Tiefenbereich 0 - 10 mm ein betonspezifischer Wert ist, der Beton von anderen Baustoffen und von Beton mit anderen Zementen, unterscheidet.

Das Zeitverhalten unterschiedlich nachbehandelter Wandbetone zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

1. In der Mehrzahl aller Fälle sind auch im Alter von 400 bis 1000 Tagen die Fraktilradien der nachbehandelten Wandhälften kleiner als die der nicht nachbehandelten. Die bessere Ausgangssituation bewirkt auch das günstigere Zeitverhalten.
2. Die Karbonatisierung dringt am schnellsten bei den Wandhälften mit der schlechtesten Qualität und den ungünstigsten Lagerungsbedingungen vor. Demnach müßte sich bei der Wand BL ($w/z = 0,7$, Laborlagerung) und eventuell BF, C, D (ebenfalls $w/z = 0,7$) eine Umkehrung im Verhältnis der nicht nachbehandelten zu den nachbehandelten Wandhälften ergeben.

Dies läßt sich an Hand der Versuchsergebnisse jedoch noch nicht ablesen. Offensichtlich ist das Betonalter von bis zu 1000 Tagen noch zu gering, um unterschiedlich starke Karbonatisierung unterschiedlich gelagerter und nachbehandelter Wände an Hand von Fraktilradien nachweisen zu können.

2.4.1.2 Transportrelevante Porenkennwerte (Bilder D33 bis D56)

Dargestellt sind für jede der sechs Wände die transportrelevanten Porenkennwerte, getrennt nach der unterschiedlichen Nachbehandlung für die Wandtiefen 0 - 10 mm, 10 - 20 mm und für die Wandmitte.

Auch hier werden die Werte im Alter von 7 Tagen getrennt von der zeitlichen Entwicklung betrachtet. Die Wirkungstiefe einer Nachbehandlung wird aus dem Vergleich der Wandtiefen abgeschätzt.

Beurteilung der Wirkung einer Nachbehandlung auf die Betonqualität des 7 Tage alten Betons

Für alle Wände gilt, daß die Nachbehandlung in der äußersten Betonschicht von 0 - 10 mm eine Reduktion der transportwirksamen Porenkennwerte bewirkt. Der Einfluß auf die Teilporositäten ist stärker als auf die hydraulischen Radien. Die Wirksamkeit ist umso größer, je höher der w/z-Wert ist.

Dieses einheitliche Bild gilt für die Tiefe von 10 - 20 mm nicht mehr. Bei Wandpaar A sind für die nachbehandelten Wandhälften die Teilporositäten größer als für die nicht nachbehandelten Wandhälften. Bei den übrigen Wänden zeigt sich dagegen der positive Einfluß der Nachbehandlung. Somit ist die Wirkungstiefe einer Nachbehandlung in erster Linie von der Betonzusammensetzung abhängig. Sie reicht umso tiefer, je höher der w/z-Wert ist.

In Wandmitte ist erwartungsgemäß kein Einfluß der Nachbehandlung mehr nachweisbar. Dort vorhandenen Unterschiede sind in erster Linie auf zufällige Mischungsschwankungen zurückzuführen, sind also herstellungsbedingt. Da sie aber z.T. von gleicher Größenordnung wie in den anderen Tiefen sind, schränkt dies die Aussagekraft bisheriger Feststellungen ein. Deshalb läßt sich auch der Einfluß der äußeren Bedingungen auf die Wirksamkeit einer Nachbehandlung hier nicht feststellen.

Insgesamt ist der Einfluß der Nachbehandlung geringer, als er bei Versuchen an gesondert hergestellten Probekörpern festgestellt wurde [D3,D4,D5].

Stellvertretend ist für Wand BF in Bild B57 der Gesamteinfluß einer Nachbehandlung auf die Porenradienverteilung dargestellt. In einem neun-achsigen Diagramm sind alle hier besprochenen Kennwerte für vier verschiedene Fälle aufgetragen. Die nachbehandelte Tiefe 0 - 10 mm weist somit ungefähr die Eigenschaften der Tiefe 10 - 20 mm auf. Durch eine Nachbehandlung kann aber nicht die Qualität des Betons der Wandmitte erreicht werden. Die herstellungsbedingten Unterschiede zwischen den verschiedenen Wandtiefen (vgl. Berichtsteil C) überwiegen, und sind durch eine Nachbehandlung nur zu einem Teil ausgleichbar (Anmerkung: Die Betonqualität ist umso besser, je kleiner die vom Polygonzug der Messwerte eingeschlossene Fläche ist, da mit zunehmender Qualität sowohl das Porenvolumen abnimmt, als auch die Porenradienverteilung feinporiger wird).

Zeitliche Entwicklung der Porenkennwerte in Abhängigkeit der Nachbehandlung

Da zuvor festgestellt wurde, daß sich der Einfluß einer Nachbehandlung im wesentlichen auf die Tiefe 0 - 10 mm beschränkt, wird im folgenden nur diese Tiefe betrachtet.

Beim Wandpaar A weist die nachbehandelte Wandhälfte geringfügig geringere Teilporositäten und hydraulische Radien auf, als die nicht nachbehandelte Wandhälfte. Während die Kurven für ϵ_{abs} und ϵ_{diff} konstant bzw. leicht abfallen, ergibt sich für die hydraulischen Radien eher ein leichter Anstieg, oftmals begleitet von einem ständigen Wechsel in der Rangordnung nachbehandelter und nicht nachbehandelter Wände. Nur bezüglich der Teilporositäten bleibt bis zu einem Alter von 1000 Tagen der Vorteil einer Nachbehandlung erhalten.

Für die übrigen Wände ist sowohl für die nachbehandelte wie auch die nicht nachbehandelte Wandhälfte eine Abnahme der Porosität feststellbar. Da sie für die nicht nachbehandelte Wandhälfte größer ausfällt, weisen beide Wandhälften nach ca. 1000 Tagen eine ungefähr gleich große Porosität auf. Der verstärkte Abbau der Porosität der nicht nachbehandelten Wandhälfte ist auf im Vergleich zur nachbehandelten Wandhälfte ausgeprägtere Nachhydratation und Karbonatisierung zurückzuführen. Somit führt auch hier die Nachbehandlung zur besseren Betonqualität. Nur ist dies nicht mehr an Hand der Porosität ablesbar, da bei PZ-Betonen mit zunehmender Karbonatisierung die Porosität abnimmt.

Die hydraulischen Radien der Wände B - D sind in erster Näherung konstant. Dieses unterschiedliche Verhalten zu Wandpaar A ist auf die unterschiedliche Betonzusammensetzung zurückzuführen und wird in Abschnitt 2.5.1 näher erläutert.

2.5 Einfluß der Betonzusammensetzung

2.5.1 Einfluß des w/z-Wertes

2.5.1.1 Fraktilradien der Wände A und B (Bilder D58 bis D60)

Dargestellt sind die Fraktilradien der Wände A und B getrennt nach den Lagerungsarten. Sowohl die Art der Nachbehandlung, als auch die beiden Wandtiefen 0 - 10 mm und Wandmitte sind durch verschiedene Symbole gekennzeichnet.

Entsprechend Bild D6, sind die Fraktilradien bei Wand B größer als bei Wand A (auf die Einflüsse der Lagerungsbedingungen und der Nachbehandlung innerhalb eines Wandpaars wird hier nicht nochmals eingegangen). Nur bei Wand B ($w/z = 0,7$) ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Tiefen 0 - 10 mm und der Wandmitte erkennbar. Außerdem ist nur für diese Tiefe eine zeitliche Abnahme des mittleren Fraktilradius gegeben. Während bei Wand A unabhängig von weiteren Parametern und der Zeit und in Wandmitte von Wand B der mittlere Fraktilradius 30 - 50 nm beträgt, ist er in der Tiefe 0 - 10 mm der Wand B im Altersbereich 7 - 400 Tage ca. 1,5 - 3,0-fach größer. Danach fällt er auf ca. 60 nm ab. Somit ist der Einfluß des w/z-Werts abhängig von der Wandtiefe. Bei einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 ist somit eine Homogenität der Porenradienverteilung über der Wandtiefe eher gegeben, als bei einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,7, der außen grobporiger als innen ist. Auch eine intensive Nachbehandlung kann daran nichts wesentliches ändern. Erst infolge Karbonatisierung, die in den gröberen Poren des Betons mit höherem w/z-Wert wesentlich schneller voranschreitet, kommt es zu der oben beschriebenen Reduktion von r_g .

2.5.1.2 Transportrelevante Porenkennwerte der Wände A und B (Bild D61 und D62)

Analog zu den Vorgehen im Abschnitt 2.5.1.1 erfolgt die Darstellung der transportrelevanten Kennwerte. Für die Teilporositäten ergeben sich analoge Schlußfolgerungen zu den Fraktilradien. Nur in der Tiefe 0 - 10 mm der Wand

B kommt es zu einer deutlichen und stetigen Verringerung der Porosität mit zunehmendem Betonalter.

In der Größe der hydraulischen Radien ist dagegen ein Einfluß des w/z-Werts nicht erkennbar.

2.5.1.3 Transportrelevante Porenkennwerte von Haus 2 und Haus 4 in Beckum (Bild D63 und D64)

Getrennt für Haus 2 ($w/z = 0,45$, Bild D63) und Haus 4 ($w/z = 0,58$, Bild D64) sind die transportrelevanten Kennwerte dargestellt (Betonalter ca. 25 Jahre, Zementart HOZ 275).

Auch für Hochofenzement gilt, daß die Porosität umso kleiner ausfällt, je niedriger der w/z-Wert ist. Nach 25 Jahren sind für die äußersten ca. 30 mm, sowohl innen wie außen, die beiden Teilporositäten ϵ_{abs} und ϵ_{diff} für Haus 4 ca. doppelt so groß wie für Haus 2, in Wandmitte ca. 1,5-fach größer. Die Unterschiede zwischen Rand und Mitte sind Folge der Karbonatisierung. Da diese bei Haus 4 wesentlich weiter fortgeschritten ist, ist dort im Vergleich zu Haus 2, eine wesentlich breitere Randzone erhöhter Porosität vorhanden. Die Karbonatisierung bedingt auch größere hydraulische Radien. In den karbonatisierten Randbereichen sind diese für beide Häuser vergleichbar, so daß ein Einfluß des w/z - Werts nicht mehr nachweisbar ist.

In Wandmitte ergibt sich folgender Unterschied im Einfluß des w/z-Werts bezogen auf das Betonalter und die Zementart: PZ-Betone mit $w/z = 0,5$ bzw. $w/z = 0,7$ zeigen in Wandmitte eine vergleichbare Größe der Teilporositäten und hydraulischen Radien im Altersbereich bis zu ≈ 3 Jahren. HOZ-Betone im Alter von ca. 25 Jahren weisen dagegen eine 30 - 50 %-ige Zunahme der transportrelevanten Porenkennwerte bei Zunahme des w/z-Werts von 0,45 auf 0,58 auf (weitere Angaben zum Einfluß der Zementart siehe Abschn. 2.5.2).

2.5.1.4 Fraktilradien der Kleinkörper der künstlichen Bewitterung der Wände A und B (Bilder D65 bis D67)

In den Bildern D65 bis D67 sind in Abhängigkeit der Tiefe die Fraktilradien für verschiedene Zyklenzahlen dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, daß ein Anfangsunterschied (vor Beginn der Bewitterung) zwischen den Tiefen und den w/z-Werten vorhanden ist. Dieser ist nach 8000 Zyklen nicht mehr nachweisbar.

2.5.1.5 Transportrelevante Porenkennwerte der künstlich bewitterten Kleinkörper (Bild D68 und D69) zugehörig Wand A und B

Analog zu Abschnitt 2.5.1.4 sind in den Bildern D68 und D69 die entsprechenden Angaben zu den transportrelevanten Kennwerten aufgetragen. Es werden nur die Teilporositäten ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ besprochen.

Für beide w/z-Werte nimmt die Porosität mit zunehmender Zyklenzahl ab. Je höher der w/z-Wert desto größer sind dabei Anfangs- und Endwert der Entwicklung. Nur für Wand B (w/z = 0,7) ist auch nach Abschluß der Beanspruchung $\varepsilon_{\text{diff}}$ umso größer, je geringer der Abstand zur Betonoberfläche ist.

2.5.2 Einfluß der Zementart

2.5.2.1 Vergleich der Versuchshäuser 1 und 4 (Bild D70)

Der Beton der beiden Häuser ist bis auf die Zementart (Haus 1: PZ 275; Haus 4: HOZ 275) identisch zusammengesetzt. Der w/z-Wert beträgt für beide ca. 0,6. Wie Tab. B12 zeigt, unterscheiden sich die Zemente nicht nur durch den Hüttensandanteil von ca. 67 %, sondern auch durch die geringe Mahlfeinheit des PZ mit $\approx 2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ gegenüber $\approx 3700 \text{ cm}^2/\text{g}$ des HOZ. Infolge dieser geringen Mahlfeinheit ist die Erhärtungsgeschwindigkeit beider Zemente in etwa gleich langsam. Bei dem Vergleich der beiden Zementarten ist zwischen den unterschiedlich stark karbonatisierten Innen- und Außenseiten der Wände zu unterscheiden und deren Verhalten jenem des Wandinneren gegenüberzustellen.

Wandmitte

Sowohl für Haus 1 als auch für Haus 4 ist $\varepsilon_{\text{diff}}$ nur geringfügig größer als ε_{abs} (ca. 25 %). Die Absolutwerte dieser Porenanteile sind für den HOZ-Beton nur etwa halb so groß wie für den PZ-Beton. Der HOZ-Beton weist in Wandmitte die geringste Porosität auf, während der PZ-Beton von Haus 1 eher eine über die Wanddicke konstante Porosität aufweist.

Die hydraulischen Radien sind dagegen sowohl für den PZ- als auch für den HOZ-Beton in der Wandmitte am größten und fallen sowohl zur inneren als auch zur äußeren Wandoberfläche ab. Entsprechend der unterschiedlich starken Karbonatisierung der Wandinnen- und -außenseite ist der Anstieg der Porosität des HOZ-Betons und der für beide Zementarten beobachtbare Abfall der hydraulischen Radien unsymmetrisch. Der hydraulische Radius der diffusionswirksamen Poren ist für beide Zementarten in etwa gleich groß, $r_{h,\text{abs}}$ ist dagegen für den PZ-Beton mit ca. 150 nm um 100 nm kleiner als für den HOZ-Beton.

Karbonatisierte Randzone

Die Versuchsergebnisse bestätigen, daß infolge Karbonatisierung die Porosität eines PZ-Betons abnimmt, diejenige eines HOZ-Betons zunimmt. Für den PZ-Beton (Haus 1, Innenseite) betrifft dies vor allem ε_{abs} , da der Betrag um den ε_{abs} der Tiefe 13 - 14 cm gegenüber der Tiefe 14 - 15 cm abfällt, fast genauso groß ist wie derjenige, um den sich $\varepsilon_{\text{diff}}$ verringert. Die karbonatisierungsbedingte Zunahme der Porosität von HOZ-Betonen betrifft dagegen nicht so sehr ε_{abs} (Zunahme um ca. 5 cm³/kg), sondern in erster Linie Poren des Radienbereiches 30 - 100 nm, da $\varepsilon_{\text{diff}}$ um bis zu 20 cm³/kg zunimmt und damit den doppelten Wert wie in Wandmitte erreicht.

Entsprechend sind die Auswirkungen auf die hydraulischen Radien. Für den PZ-Beton bedeutet der Abbau der großen Poren ($r > 100$ nm) sowohl eine Abnahme von $r_{h,\text{abs}}$ als auch von $r_{h,\text{diff}}$: das Porensystem wird durch die Karbonatisierung insgesamt feinporiger. Eine größere Feinporigkeit entsteht aber auch dann, wenn zu bestehenden Poren bestimmter Größe neue Poren mit vergleichsweise kleinem Radius hinzukommen. Dies trifft im wesentlichen auf den HOZ-Beton zu, so daß auch deren hydraulische Radien infolge Karbonatisierung abnehmen.

2.5.2.2 Vergleich der Versuchshäuser 3 und 4 (Bild D71)

Für Haus 3 wurde ein HOZ 375 und ein w/z-Wert von 0,54 und für Haus 4 ein HOZ 275 und ein w/z-Wert von 0,58 verwendet. Somit ist in erster Linie die unterschiedliche Mahlfeinheit der Zemente zu beachten, da, wie Tab. B12 zeigt, die chemische Zusammensetzung nahezu identisch ist (HOZ 375 58 % Hüttensand, HOZ 275 68 % Hüttensand). Die spezifische Oberfläche des HOZ 375 ist mit $4600 \text{ cm}^2/\text{g}$ um ca. $900 \text{ cm}^2/\text{g}$ größer als die des HOZ 275.

Einfluß auf die Teilporositäten

Die Messungen deuten darauf hin, daß die Teilporositäten des HOZ 375 nur geringfügig durch eine Karbonatisierung beeinflusst werden. Gegenüber dem HOZ 275, dessen Verhalten bereits im Abschn. 2.5.2.1 diskutiert wurde, steigt $\varepsilon_{\text{diff}}$ von außen nach innen an, und für ε_{abs} läßt sich für die jeweils äußersten 10 mm sogar eine Verringerung feststellen. Für die nicht durch Karbonatisierung beeinflussten Wandzonen übt die Mahlfeinheit nur einen geringen Einfluß auf die Porosität aus.

Einfluß auf die hydraulischen Radien

Die für den HOZ 375 festgestellte geringfügige Verringerung von ε_{abs} führt auf umso geringere hydraulische Radien, je geringer der Abstand von der Wandoberfläche ist. Die Absolutwerte sind für den HOZ 375 geringfügig kleiner als für den HOZ 275.

2.5.3 Einfluß der Sieblinie und des Zuschlaggrößtkorns

2.5.3.1 Einfluß der Sieblinie auf die Fraktilradien der Wände BF, C und D (Bilder D72 bis D81)

Im Abschn. C2 wurde auf den Einfluß der Schalungswand auf die volumenmäßige Verteilung von Zuschlag und Zementstein hingewiesen. Die Tiefe der Einflußzone ergab sich in Abhängigkeit des Größtkorndurchmessers. Die Unterschiede in der Porosität und Porenradienverteilung zwischen Wandmitte und oberflächennaher Zone sind für die Betonwände in erster Linie auf diesen Umstand zurückzuführen.

Um den Einfluß der Schalungswand aufzuzeigen, sind deshalb getrennt für die Tiefen 0 - 10, 10 - 20 mm und die Wandmitte die Fraktilradien in ihrer zeitlichen Entwicklung wiedergegeben. Es erfolgt ein Vergleich der Betonwand BF mit den ebenfalls im Freien aufgestellten Mörtelwänden C und D. Diese Wände weisen den gleichen w/z-Wert von 0,7 auf.

Betrachtet werden zunächst die Ausgangswerte im Alter von 7 Tagen. Unabhängig von der Nachbehandlung und Tiefe sind die Ergebnisse der beiden Mörtelwände. Im Vergleich zur Betonwand ist deren Porenstruktur wesentlich feinporiger. Dieser Unterschied ist abhängig von der betrachteten Wandtiefe und Nachbehandlung. Am Beispiel des mittleren Fraktilradius wird dies deutlich (Bild D72 und D73). Für die Mörtelwände liegt der mittlere Fraktilradius unabhängig von der betrachteten Wandtiefe und je nach Nachbehandlung zwischen ca. 35 und 50 nm. Für die nachbehandelte Hälfte der Wand BF ist dagegen erst ab der Tiefe 10 - 20 mm ein Fraktilradius von ca. 50 nm vorhanden (in der Tiefe 0 - 10 mm beträgt dieser ungefähr 80 nm). Für die nicht nachbehandelte Hälfte der Wand BF läßt sich diese Inhomogenität auch in der Tiefe 10 - 20 mm nachweisen. Wesentliche Unterschiede sind dabei auf die Radien $r_{0,50}$ und $r_{0,75}$ beschränkt.

Da die Wände BF, C und D vergleichbaren Bedingungen ausgesetzt sind und sich im wesentlichen nur durch ihre Sieblinie unterscheiden, ist dieses unterschiedliche Verhalten der inhomogenen Verteilung von Zementstein und Zuschlag bei der Betonwand, zuzuschreiben.

2.5.3.2 Einfluß der Sieblinie auf die transportrelevanten Porenkennwerte der Wände BF, C und D (Bilder D82 bis D89).

Zu jedem Alter und in jeder Tiefe sind die hydraulischen Radien der Wand BF größer als diejenigen der Wände C und D. Dagegen ist ε_{diff} zu jedem Alter und in jeder Tiefe bei den Mörtelwänden deutlich größer als bei der Betonwand BF. ε_{abs} ist für alle Wände ungefähr gleich groß. Da die Oberfläche des Sandzuschlags der Mörtelwände aber bedeutend größer ist als diejenige des Kies-Sand-Zuschlags der Betonwand, muß die Verbundporosität der Mörtelwand im Vergleich zu derjenigen der Betonwand aus mehr Poren mit geringerem Radius bestehen. Somit übt der Größtkorndurchmesser einen entscheidenden Einfluß auf die Struktur der Verbundporosität aus. Diese Feststel-

lungen gelten sowohl für nachbehandelte als auch für nicht nachbehandelte Wändhälften, auch wenn die Absolutbeträge der Teilporositäten für die nicht nachbehandelten Wändhälften größer sind.

Für die Mörtelwände ist der Einfluß der Wandtiefe vernachlässigbar.

2.5.3.3 Einfluß der Sieblinie bei künstlicher Bewitterung (Bilder D89 und D90)

Das Verhalten von Mörtel und Beton infolge künstlicher Bewitterung ist nicht vergleichbar. Der Mörtel weist auch nach 8000 Zyklen ein Gefälle abnehmender Teilporositäten von außen nach innen auf. Dabei sind die Werte gegenüber dem Beton der Wand B um $5 - 15 \text{ cm}^3/\text{kg}$ größer (Zur Erinnerung: Die Teilporositäten von Wand B sind nach 8000 Zyklen nahezu konstant, Abschn. 2.5.1).

2.6 Einfluß des Betonierdatums

Ein Vergleich der beiden Wände C und D (Mörtelwände identischer Parameter) mit unterschiedlichem Herstellungsdatum (Wand C: Anfang Oktober, Wand D: Anfang Juli) soll den Einfluß unterschiedlicher Witterungsverhältnisse im jungen Betonalter (Wand C: naß-kalt; Wand D: warm-trocken) auf die Entwicklung der Porosität und Porenradienverteilung zeigen. Dazu werden die Darstellungen des Abschnitts 2.5.3 (Bilder D72 bis D89) erneut herangezogen.

2.6.1 Einfluß des Betonierdatums auf die Fraktilradien von Wand C und D

Der Einfluß der äußeren Bedingungen in Anschluß an die Betonage wirkt sich erst nach Abschluß der Nachbehandlung aus. Unterschiede zwischen Wand C und D in den 7 Tage Werten spiegeln zufällige Einflüsse (Streuung in der Zusammensetzung, Ausführung der Verdichtung und Nachbehandlung usw.) wider. Diese sind wie die Bilder D72 bis D81 zeigen, klein.

Auch die zeitliche Entwicklung ist für beide Wände gleichartig. Ein signifikanter Unterschied läßt sich auch für einzelne Tiefen nicht feststellen.

2.6.2 Einfluß des Betonierdatums auf die transportrelevanten Kennwerte von Wand C und D

Im Gegensatz zu den Fraktilradien zeigen die Ergebnisse der transportrelevanten Kennwerte in der Regel für Wand D größere Werte als für Wand C, so daß das trocken-warme Sommerwetter sich negativ auf die transportrelevanten Teilporositäten und hydraulische Radien auswirkt und eine schlechtere Betonqualität zur Folge hat (siehe Bilder D82 bis D89). Auf nähere Einzelheiten wird nicht eingegangen.

2.7 Einfluß der versuchsvorbereitenden Trocknungsart

An 15 zufällig ausgewählten Proben der Wandmitte (sechs Bohrkern verteilt auf die verschiedenen Wände, jeweils zwei bis drei Versuche pro Kern) wurden zusätzlich Untersuchungen durchgeführt, nachdem diese Proben bei 105 °C getrocknet wurden. Ein Vergleich der Ergebnisse mit denjenigen an im Vakuum getrockneten Proben für die transportrelevanten Kennwerte enthält Tab. D4.

Im Mittel aller Werte ergibt sich:

1. Die Teilporositäten sind infolge Trockenschrantrocknung um den Faktor 1,7 größer als infolge Vakuumtrocknung.
2. Unabhängig von der Trocknungsart ist $\varepsilon_{\text{diff}}$ ungefähr doppelt so groß wie ε_{abs} und $r_{h,\text{abs}}$ ca. 2,5-fach größer als $r_{h,\text{diff}}$.
3. Die hydraulischen Radien sind infolge Trockenschrantrocknung geringfügig kleiner als infolge Vakuumtrocknung.

Die Trockenschrantrocknung bewirkt somit eine Erhöhung der Porosität aller Radienbereiche. Dies beruht auf folgendem Umstand: Die erhöhte Temperatur führt leichter als eine normale Umgebungstemperatur auf eine Dehydratisierung und eine dadurch bedingte Abnahme des Hydratationsgrads. Zusätzlich können durch die sehr schnelle Aufheizung (die Proben mit normaler Umgebungstemperatur wurden in einen Ofen eingebracht, der bereits auf 105 °C aufgeheizt ist) und die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Zementstein, Zuschlag und Wasser Risse entstehen. Diese zusätzlichen Strukturänderungen bewirken eine Zunahme der Porosität.

Durch die Trockenschrantrocknung entsteht somit eine zusätzliche Porosität (Strukturveränderung), die für den Bauwerksbeton nicht möglich ist. Damit scheidet diese Trocknungsart für die hier durchgeführten Untersuchungen aus.

2.8 Nicht dargestellte Untersuchungen

Stichprobenartig wurden auch die Porosität und Porenradienverteilung an Proben der Institutswand und der Kühlhauswand untersucht. Da zu diesen Objekten aber keine näheren Angaben hinsichtlich der Betonzusammensetzung und Nachbehandlung vorliegen, wird auf die Kommentierung dieser Untersuchungen verzichtet. In Tab. D5 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Es ergibt sich ein ähnlicher Effekt wie für die Versuchshäuser in Beckum, ein nur geringer Unterschied zwischen ϵ_{abs} und ϵ_{diff} und relativ hohe Werte für die hydraulischen Radien.

Für eine umfangreiche Stichprobe wurden außerdem zusätzliche Untersuchungen mit einem Makroporosimeter durchgeführt, mit dem die Poren des Radienbereiches 1 μm bis 60 μm erfaßt werden. Da sich dabei keine wesentlichen zusätzlichen Porositäten ergaben, wird auf die Wiedergabe dieser Ergebnisse verzichtet. Ihr Einfluß auf das Transportverhalten ist nicht signifikant.

3. AUSWERTUNG DER LABORUNTERSUCHUNGEN ZUR DICHTIGKEIT

3.1 Erläuterung zu den Auswertungen

Wie Berichtsteil B zu entnehmen ist, erfolgte für die im Freien aufgestellten Wände die Bohrkernaufteilung so, daß aus dem "Nordende" der Bohrkern die Proben für die Quecksilberdruckporosimetrie entnommen wurden. Aus dem "Südende" entstammen diejenigen für die Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme. Dadurch waren die oberflächennahen Betonbereiche aufgebraucht, und für die Diffusionsversuche standen nur noch Proben aus dem mittleren Bohrkernbereich zur Verfügung. Erst für die Bohrkern zu einem Alter größer als 400 Tage wurde davon abgewichen, indem nun die Proben der Quecksilberdruckporosimetrie und kapillaren Wasseraufnahme dem "Südende" des Bohrkerns entstammen und die Proben der Diffusionsversuche dem "Nord-

ende" entnommen wurden. Die Ergebnisse der Porositätsmessungen und diejenigen zur kapillaren Wasseraufnahme sind somit direkt vergleichbar, da deren Proben derselben Wandseite entnommen wurden, bzw. bis zu einem Alter von 400 Tagen die Unterschiede zwischen der Süd- und Nordseite der Wand gering sind.

Eine Entnahme von Proben zur Quecksilberdruckporosimetrie und zur Bestimmung des CO_2 -Diffusionskoeffizienten aus derselben Bohrkerntiefe war nicht möglich, da für die Diffusionsversuche unzerstörte Scheiben des Bohrkern-durchmessers erforderlich waren.

Im Abschnitt 3.2 werden die Ergebnisse der kapillaren Saugversuche und im Abschnitt 3.3 diejenigen der Diffusionsversuche besprochen. Analog zum vorangegangenen Abschnitt wird auch hier das Versuchsziel zeitliche Entwicklung der Dichtigkeit in Abhängigkeit betontechnologischer Parameter untersucht. Die Versuche an den künstlich bewitterten Kleinkörpern werden nicht mit aufgenommen, da festgestellt wurde, daß natürliche und künstliche Bewitterung keine physikalisch vergleichbare Beanspruchung darstellen.

3.2 Auswertung der Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme

Die Auswertungen beschränken sich auf die Wände A - D und die Versuchshäuser in Beckum.

3.2.1 Ergebnisse der Wände A - D

Der Einfluß der Parameter

- Lagerungsbedingung
- Nachbehandlung
- Betonzusammensetzung (w/z-Wert, Zementart, Sieblinie)
- Betonierdatum

auf Größe und zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten A und die Wasserkapazität ψ wird für Proben der Entnahmetiefe 0 - 50 mm untersucht. Daran schließt sich der Vergleich mit Proben der Entnahmetiefen 10 - 50 mm bzw. 20 - 50 mm an, um den Einfluß der Wandtiefe zu ermitteln.

Zunächst wird der Wasseraufnahmekoeffizient und daran anschließend die Wasserkapazität besprochen.

Dabei werden die Beziehungen des Berichtsteils C sowie die Ergebnisse der Auswertung der Porenradienverteilungen wie folgt berücksichtigt:

$$- A = k_2 \sqrt{2 r_{h,abs}} \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \frac{1}{a_{t,abs}} \quad (D2)$$

$$- h(t) = k_1 \sqrt{2 r_{h,abs}} \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{a_{t,abs}} \quad (D3)$$

- ε_{abs} nimmt für nicht karbonatisierte Proben mit der Wandtiefe ab (PZ Beton).
- ε_{abs} nimmt infolge Karbonatisierung ab (PZ Beton).
- $r_{h,abs}$ kann näherungsweise als unabhängig von der Wandtiefe und der Karbonatisierung angesehen werden.
- Über $a_{t,abs}$ sind bisher keine Aussagen möglich.

Demnach müßten der Wasseraufnahmekoeffizient und die Wasserkapazität des karbonatisierten Betons kleiner sein als die des nicht karbonatisierten Betons (bei ansonsten gleichen Verhältnissen).

Als weitere Schlußfolgerungen ergeben sich:

- Der Beton teilkarbonatisierter Proben kann nicht mehr als homogen angesehen werden.
- Die Ergebnisse der Versuche an Beton unterschiedlicher Zusammensetzung und Nachbehandlung sind nur bei einheitlicher Durchfeuchtungsrichtung vergleichbar (hier: Wasserkontakt mit der karbonatisierten Probenseite, so daß die Durchfeuchtung des nicht karbonatisierten Probenteils über die karbonatisierte Oberflächenschicht erfolgt).
- Die Proportionalität zwischen flächenbezogener Gewichtszunahme und \sqrt{t} gilt somit nur noch getrennt für den karbonatisierten und nicht karbonatisierten Probenteil.

Dies hat wiederum Konsequenzen für die Versuchsauswertung. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden. Angegeben werden können somit (Bild D91):

- a) getrennte Werte des Wasseraufnahmekoeffizienten für den karbonatisierten und den unkarbonatisierten Teilbereich der Probe (ein Wert der sich von demjenigen des Betons an sich (Durchfeuchtung ohne karbonatisierten Randbereich) deutlich unterscheidet).
- b) oder für den Fall, daß die Karbonatisierungstiefe nur wenige Millimeter beträgt, der Wasseraufnahmekoeffizient derjenigen Ausgleichsgeraden die alle Meßwerte bis zum Zeitpunkt der Probendurchfeuchtung enthält.

Fall b) wird hier für die Wände A - D angewendet; Fall a) für die Versuchshäuser in Beckum.

Bild D91 zeigt in einer schematischen Darstellung die Konsequenzen dieses Vorgehens. Insbesondere im Fall b) sind die so ermittelten Werte nur Näherungswerte der tatsächlichen Betoneigenschaften. Um bei den Wänden A - D die Werte aller Altersstufen an Proben der Tiefe 0 - 50 mm vergleichen zu können und weil der Karbonatisierungseinfluß noch vernachlässigbar ist, wird dies in Kauf genommen.

3.2.1.1 Einfluß der Lagerungsbedingungen (Wandpaar A und B)

Wasseraufnahmekoeffizient der 5 cm hohen Proben

Für die Wände A und B (gemeinsam in Bild D92 dargestellt) zeigt sich mit zunehmendem Alter ein kontinuierlicher Abfall der Werte. Dies entspricht einer zunehmenden Dichtigkeit des oberflächennahen Betons. Gleichzeitig verringert sich mit dem Alter die Streubreite der Ergebnisse. Da diese im wesentlichen durch das gemeinsame Auftragen von Werten unterschiedlicher Zusammensetzung entsteht, bedeutet dies, daß die Unterschiede zwischen den Wänden mit zunehmendem Betonalter kleiner werden. Die oberflächennahe Schicht der Laborwände weist größere Wasseraufnahmekoeffizienten auf, als jene der im Freien aufgestellten Wände.

Ab einem Alter von ca. 400 Tagen übt die Karbonatisierung einen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis aus. Da diese im Laborklima und für Beton mit

höherem w/z-Wert schneller voranschreitet als bei Freilagerung und Beton mit niedrigerem w/z-Wert, bewirkt sie bei PZ-Beton eine Angleichung von Beton unterschiedlicher Ausgangsqualität und Witterungsbeanspruchung, hin zu dichterem Beton. Die vorderste karbonatisierte Randschicht bestimmt somit die kapillare Wasseraufnahme der gesamten Probe. Der Zusammenhang zwischen Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit ist nicht mehr eindeutig.

Wasseraufnahmekoeffizient der 4 cm hohen Probe der Entnahmetiefe 10 - 50 mm (Bild D92)

Es zeigt sich auch hier eine altersbedingte Abnahme des Wasseraufnahmekoeffizienten. Der Einfluß unterschiedlicher Lagerungsverhältnisse ist abgeschwächt vorhanden. Im Alter von 7 und 90 Tagen sind die L-Wände dichter als die F-Wände, aber ab dem Alter von 400 Tagen kehrt sich dieses Verhältnis um. Somit ist bei genauerer Betrachtung nur für die F-Wände zu allen Altern eine zunehmende Dichtigkeit festzustellen. Für die L-Wände fällt der Wasseraufnahmekoeffizient vom 7. zum 90. Tag ab, bleibt danach eher konstant.

Unabhängig von den äußeren Lagerungsbedingungen und den übrigen Parametern sind zu jeder untersuchten Altersstufe die Werte der Proben der Tiefe 10 - 50 mm größer als diejenigen der Proben 0 - 50 mm. Für dieses Verhalten kommen zwei Ursachen in Betracht. Zum einen könnte die Probenhöhe von Einfluß sein, aber eine Nebenuntersuchung zeigte, daß dies nicht zutreffend ist. Zum anderen könnte das Fehlen der vordersten 10 mm von signifikantem Einfluß sein.

Somit ist zu bestimmen, welche Inhomogenität zwischen dem Beton der Tiefe 0 - 10 mm und derjenigen der Tiefe 10 - 50 mm besteht. Diese muß bereits zum Betonalter von 7 Tagen vorhanden sein und ist somit nicht eine Folge der Karbonatisierung oder nicht abgeschlossener Hydratation. Dadurch rücken herstellungsbedingte Einflüsse in den Vordergrund. Darauf deutet auch Bild D93 hin. Im unteren Teil sind, die Ergebnisse an Proben der Tiefe 20 - 50 mm und 10 - 50 mm gegenübergestellt. Auch wenn die Streuung groß ist, sind für beide Tiefenbereiche keine signifikanten Abweichungen von der Winkelhalbierenden festzustellen. Im Mittel weisen diese Proben gleiche Wasseraufnahmekoeffizienten auf. Dies gilt nicht für den Vergleich der Proben der Tiefenbereiche 0 - 50 mm mit denen der Tiefenbereiche 10 - 50 mm

(Bild D93 oben). In der Regel liegen hier die Werte - unabhängig ob eine Nachbehandlung erfolgte oder nicht - unterhalb der Winkelhalbierenden.

Nach Abschnitt C, Bild C3 unterscheidet sich die Tiefe 0 - 10 mm vor allem in ihrer Kornstruktur wesentlich von den übrigen Tiefen. Der Raumanteil der Zuschlagkörner < 7 mm weist in der Tiefe von 4 mm von der Oberfläche ein Maximum auf. Da bei den Wänden A und B weniger als 25 % des Zuschlags auf Körner mit einem Durchmesser > 8 mm entfallen, ist diese Verteilung auch hier zu erwarten. Da hier dichte Zuschläge verwendet wurden, stellen sie in Tiefen verstärkter Anreicherung eine "Sperrschicht" für die Durchfeuchtung tieferliegender Betonbereiche dar. Somit ist infolge der ungleichmäßigen Verteilung von Zuschlag und Zementstein, trotz erhöhtem Zementsteinanteils und damit auch größerer Porosität in der Tiefe 0 - 10 mm, der Wasseraufnahmekoeffizient der Proben 0 - 50 mm insgesamt kleiner als jener der Proben 10 - 50 mm.

Diese Inhomogenität bezieht sich nur auf die Verteilung von Zuschlag und Zementstein und nicht auf Inhomogenitäten bezüglich der Porenstruktur und Porenradienverteilung. Letztere sind beispielsweise für die Karbonatisierung typisch, und äußern sich derart auf den Vorgang der Wasseraufnahme, daß jeweils verschiedene Wasseraufnahmekoeffizienten für die verschiedenen Teilschichten gültig sind. Eine derartige Wirkung der Mischungsinhomogenität kann an Hand der Versuchsergebnisse ausgeschlossen werden. Für die gesamte Probenhöhe von 0 - 50 mm Wandtiefe ist bei Durchfeuchtung von der Wandoberfläche aus nur ein Wasseraufnahmekoeffizient maßgebend, da alle Meßwerte auf einer Regressionsgeraden liegen. Somit ist die kapillare Wasseraufnahme in diesem Fall durch die in 4 mm Tiefe befindliche oberflächen-nahe "Engstelle" bestimmt. Offenbar reichen die Unterschiede zwischen ϵ_{abs} verschiedener Wandtiefen alleine nicht aus, um getrennte Wasseraufnahmekoeffizienten entstehen zu lassen. Nur die gemeinsame Veränderung der Porosität und Porenstruktur - wie im Fall der Karbonatisierung - hat einen signifikanten Einfluß auf den Wasseraufnahmekoeffizienten (siehe Abschnitt 4).

Wasserkapazität der 5 cm hohen Proben der Tiefe 0 - 50 mm (Bild D94)

Die Wasserkapazität nimmt mit zunehmendem Alter für beide Lagerungsbedingungen ab. Dies betrifft in erster Linie Wandpaar B. Die Werte der Labor-

wände bleiben auch mit zunehmendem Alter größer als jene der im Freien aufgestellten Wände.

Wasserkapazität der 4 cm hohen Proben der Tiefe 10 - 50 mm (Bilder D94 und D95)

Auch die Wasserkapazität der Proben 10 - 50 mm ist größer als diejenige der Tiefe 0 - 50 mm. Außerdem ist für die zuerst angesprochenen Proben keine eindeutige Rangordnung der Lagerungsverhältnisse gegeben. Die größere Porosität der Tiefe 0 - 10 mm hat somit keinen Einfluß auf die Wasserkapazität. Während die Wasserkapazität aller Wände (Bild D95 oben, einschließlich der Wände C und D) der Proben 0 - 50 mm um ca. 5 Vol.-% streut, beträgt die Wasserkapazität der zugehörigen Proben 10 - 50 mm 5 - 15 Vol.-%. Die Abtrennung der vordersten 10 mm führt zu einer wesentlich stärkeren Durchfeuchtung (größerer Wassergehalt), so daß nicht in jedem Fall alle vorhandenen kapillar wirksamen Poren des Betons auch tatsächlich an der Wasseraufnahme beteiligt sind.

Im unteren Teil von Bild D95 ist zusätzlich der Wasseraufnahmekoeffizient über der Wasserkapazität aufgetragen. Unabhängig von der Wandtiefe sind näherungsweise beide Größen einander proportional.

3.2.1.2 Einfluß der Nachbehandlung (Wand A - D)

Da die Wirkungstiefe der Nachbehandlung auf die vordersten 10 bis 20 mm beschränkt ist, wird sich ihr Einfluß auf 50 mm hohe Proben bzw. auf Proben von denen die vordersten 10 mm entfernt wurden, nur eingeschränkt nachweisen lassen. Deshalb verringern sich weder der Wasseraufnahmekoeffizient noch die Wasserkapazität der 0 - 50 mm Proben infolge einer Nachbehandlung (siehe Bilder D96 bis D100). Eine Rangordnung der Werte bezüglich der Nachbehandlung ist nicht erkennbar.

3.2.1.3 Einfluß der Betonzusammensetzung

3.2.1.3.1 Einfluß des w/z-Werts (Bilder D96 bis D100)

Wasseraufnahmekoeffizient der 5 cm hohen Proben der Tiefe 0 - 50 mm (Bilder D96 bis D98, obere Bildhälften)

Der w/z-Wert übt den größten Einfluß auf den Wasseraufnahmekoeffizienten aus. Dieser ist umso größer, je jünger der Beton ist, so daß die zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten ebenfalls vom w/z-Wert abhängt. Während für Wand A ($w/z = 0,5$) der Wasseraufnahmekoeffizient nahezu konstant ist und erst im Alter von ≈ 1000 Tagen deutlich unter $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ sinkt, nimmt er für den Beton von Wand B ($w/z = 0,7$) von ca. $1,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ im Alter von 7 Tagen auf ca. $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ im Alter von ≈ 1000 Tagen ab. Somit weist Wand B nach ca. 1000 Tagen ungefähr die Dichtigkeit auf, die Wand A bereits nach 7 Tagen hatte.

Diese Ergebnisse spiegeln die Veränderungen der Porenradialverteilung wider. Hierfür sind die Veränderungen der kapillar wirksamen Porosität ε_{abs} verantwortlich (vergleiche Abschn. D2).

Wasseraufnahmekoeffizient der 4 cm hohen Proben der Tiefe 10 - 50 mm (Bilder D96 bis D97, untere Bildhälften)

Durch Entfernen der vordersten 10 mm kommt es bei den Wänden A und B zu einer Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten um ca. $\Delta A \approx 0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$. Dies gilt für alle Alter. Für Wand A entspricht dies in etwa einer Verdoppelung des Wasseraufnahmekoeffizienten. Dies übersteigt deutlich den Einfluß der Nachbehandlung und den der Lagerungsbedingung, und steht nicht in Einklang mit abnehmender Porosität bei zunehmender Entfernung von der Wandoberfläche. Somit sind die herstellungsbedingten Unterschiede zwischen der Wandtiefe 0 - 10 mm und den Tiefen größer 10 mm ähnlich bedeutsam für die Dichtigkeit des Betons der Betondeckung wie die Betonzusammensetzung.

Wasserkapazität (Bilder D98 - D100)

Es gelten analoge Feststellungen wie für den Wasseraufnahmekoeffizienten. Der Unterschied zwischen den Proben 0 - 50 mm und 10 - 50 mm fällt aller-

dings geringer aus. Auch hierbei steht der Abfall der Wasserkapazität von Wandpaar B von 10 - 15 Vol.-% im Alter von 7 Tagen auf ca. 5 Vol.-% für Betonalter $t \geq 90$ Tage nicht in Einklang mit einer viel geringeren Abnahme der Teilporosität ε_{abs} .

3.2.1.3.2 Einfluß der Sieblinie (Bilder D101 und D102)

Verglichen werden die im Freien aufgestellten Wände mit $w/z = 0,7$. Bis zum Alter von 90 Tagen ist der Wasseraufnahmekoeffizient der Mörtelwände annähernd konstant. Er liegt mit $A \approx 1,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ zwischen denjenigen der Proben der Tiefe 0 - 50 mm und 10 - 50 mm der Wand BF. Die Wasserkapazität der Mörtelwände für $t \leq 90$ Tage ist geringfügig geringer als die der Betonwand.

3.2.1.4 Einfluß des Betonierdatums (Bild D98)

Es werden nur die Ergebnisse der Proben der Tiefe 0 - 50 mm betrachtet. Bis zu einem Alter von 90 Tagen sind die Werte des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand C deutlich geringer ($0,5 - 1,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$) als von Wand D, so daß die trockene Sommerwitterung, die der Betonage von Wand D folgte, eine schlechtere Hydratation und größere Undichtigkeit bewirkte. Dies wird von den Ergebnissen der Wasserkapazität zum Teil bestätigt.

3.2.2 Ergebnisse der Versuchshäuser in Beckum

Im Mittelpunkt des Interesses steht der Einfluß der Karbonatisierung. Dieser ergibt sich aus einem Vergleich der Ergebnisse der Wandmitten mit den äußeren und inneren Oberflächenbereichen. Außerdem sind folgende Einflüsse zu beachten:

- Die verschiedenen Lagerungsbedingungen (außen: ungeschützt im Freien, innen: im Freien unter Dach) und Himmelsrichtungen (Westen, Osten).
- Zementart (Haus 1: PZ 275, Häuser 2-4: HOZ 275 bzw. HOZ 375).
- w/z -Wert.

In den Bildern D103 bis D106 sind getrennt für die West- und Ostwand der vier Versuchshäuser die Ergebnisse in Abhängigkeit des Entnahmeorts der

Proben dargestellt. Für die Wandmitte wurden in der Regel Versuche an zwei nebeneinanderliegenden Proben ausgeführt. Die Proben der oberflächennahen Wandbereiche wurden zum einen als 5 cm hohe teilkarbonatisierte Gesamtprobe (Durchfeuchtung über die karbonatisierte Oberflächenzone) geprüft. Ergab sich dabei, daß die Versuchsergebnisse durch getrennte Regressionsgeraden für karbonatisierte und nicht karbonatisierte Probenteile beschrieben werden müssen, so wurde die entsprechende Säule des Histogramms in ihrer Breite geteilt, so daß der linke Säulenteil den Wasseraufnahmekoeffizienten bzw. die Wasserkapazität der karbonatisierten Randzone, der rechte Säulenteil diese Kennwerte für den nicht karbonatisierten Probenrest wiedergibt. Zusätzliche Versuche wurden für diese Wandbereiche an Proben durchgeführt, bei denen die karbonatisierte Randschicht abgetrennt wurde. Sowohl der karbonatisierte Rand als auch das verbleibende Restprobenstück wurden je für sich geprüft. Dies ermöglicht einen Vergleich der direkten Befeuchtung und der Durchfeuchtung über die karbonatisierte Randschicht.

Einfluß der Lagerungsbedingungen

Hier werden nur die Ergebnisse der Versuchshäuser 2 bis 4 betrachtet (HOZ-Betone). Der Wasseraufnahmekoeffizient und die Wasserkapazität weisen für die Wandinnenseite die größten und für die Wandaußenseite die kleinsten Werte auf. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Außenseiten der West- bzw. Ostwand ist nicht feststellbar. Nur bezüglich der Gesamtprobe ist bei Haus 3 und 4 der Wasseraufnahmekoeffizient der Ostwand ca. 3 mal so groß wie derjenige der Westwand. Obwohl infolge Karbonatisierung die Porosität von HOZ-Betonen zunimmt (siehe Abschnitt D2) und diese Zunahme sowohl für die Wandinnen- als auch für die Wandaußenseite nachgewiesen werden kann, zeigen sich deutliche Dichtigkeitsunterschiede. Infolge Karbonatisierung wird der Beton wenn er im Freien unter Dach lagert durchlässiger, wenn er aber ungeschützt der Witterung ausgesetzt ist, dichter. Bei jeweils zunehmender Porosität und abnehmenden hydraulischen Radien, kann dieses Verhalten somit nur auf eine entsprechend größere Verfeinerung der Porenstruktur von ungeschützt im Freien karbonatisierten Oberflächenbereichen zurückgeführt werden.

Einfluß der Zementart (Vergleich Haus 1 mit Haus 4)

Für einen 25 Jahre alten Beton mit $w/z = \text{ca. } 0,6$, bewirkt die Verwendung von H0Z anstelle von PZ eine ca. 2- bis 3-fach größere Dichtigkeit gegenüber kapillarer Wasseraufnahme (siehe Proben der Wandmitte). Infolge Karbonatisierung nimmt der Wasseraufnahmekoeffizient von Haus 1 (PZ-Beton) sowohl auf der Wandinnenseite als auch auf der Wandaußenseite ab, wobei für die nicht karbonatisierten Probenteile in etwa die Werte des Betons der Wandmitte vorliegen. Infolge Karbonatisierung gleichen sich die Wasseraufnahmekoeffizienten von PZ- und H0Z-Betonen an.

Einfluß des w/z -Werts (Vergleich Haus 2 mit Haus 4)

Die Verringerung des w/z -Werts von 0,60 (Haus 2, Bild D104) auf 0,45 (Haus 4, Bild D106) bewirkt insbesondere auf der Wandinnenseite eine deutliche Abnahme des Wasseraufnahmekoeffizienten und der Wasserkapazität. Die Ergebnisse der Proben aus der Wandmitte sind dagegen kaum vom w/z -Wert beeinflusst.

3.3 Auswertung der CO_2 -Diffusionsversuche

An Hand der Ergebnisse der Versuche an Proben aus den Wänden A - D wird

1. Für Proben aus den mittleren Bohrkernbereichen die zeitliche Entwicklung des CO_2 -Diffusionskoeffizienten verfolgt (Bilder D107 bis D112). Nur für Wand D liegen darüberhinaus zu allen Altern D_{CO_2} -Werte für die Betondeckung vor (Bild D112).
2. Für Proben des Alters $t > 700$ Tage (Wand D: $t \geq 400$ Tage) wird außerdem der Einfluß der Wandtiefe untersucht.

Es wird der Einfluß folgender Parameter untersucht: Lagerungsbedingung, Nachbehandlung, Betonzusammensetzung und versuchsvorbereitende Probentrocknung (siehe Abschn. 3.3.1). Die Ergebnisse für die Versuchshäuser und die Kühlhauswand (allgemeine Witterungsbeanspruchung und Spezialfall der Beanspruchung der durch hohe Luftfeuchten gekennzeichnet ist) werden als Profile des CO_2 -Diffusionskoeffizienten über der Wandtiefe dargestellt (Bilder D113 - D115; siehe Abschn. 3.3.2).

3.3.1 Ergebnisse der Wände A - D

3.3.1.1 Einfluß der Lagerungsbedingung

Da für Betonalter $t \leq 400$ Tage in erster Linie nur Proben aus der Wandmitte untersucht wurden, läßt sich durch diese Untersuchungen der Einfluß der Lagerungsbedingung nicht studieren. Aufschluß hierzu geben die Ergebnisse der oberflächennahen Proben größeren Alters (Bild D109 und D110). Die Wände AF und BF weisen gegenüber den L-Wänden eine um ca. $\Delta D_{CO_2} = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ bis $0,50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ größere Dichtigkeit auf. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen Wandmitte und Betondeckung nachweisbar. Dies betrifft sowohl die absolute Größe der Werte als auch ihre Streuung.

Da i.d.R. auch nach 1000 Tagen nur geringe Karbonatisierungstiefen vorhanden sind, läßt sich der Einfluß der Karbonatisierung nicht eindeutig bestimmen.

3.3.1.2 Einfluß der Nachbehandlung

Die Bilder D109, D110 und D112 zeigen die Ergebnisse der mehr als 400 Tage alten Proben. Zu diesem Alter ist aber insbesondere für die F-Wände der Einfluß der Nachbehandlung nur noch bedingt erkennbar. Nur bei den Wänden AF und D ist bei den nicht nachbehandelten Wandflächen eine geringere Dichtigkeit als bei den nachbehandelten feststellbar.

Bei den L-Wänden bleibt dagegen die größere Undichtigkeit der nicht nachbehandelten Wandhälften erhalten, obwohl deren Karbonatisierungstiefe ca. 1,5 mm größer ist als jene der nachbehandelten Wandhälften.

3.3.1.3 Einfluß des w/z-Werts

Betrachtet man zunächst die Ergebnisse der mittleren Bohrkernbereiche (Bilder D107 und D108), so zeigt sich nur für die 28-Tage-Werte der F-Wände eine Dichtigkeitszunahme infolge geringeren w/z-Werts. Für alle übrigen Alter sind, unabhängig von der Lagerungsbedingung und Trocknungsart der Proben vor Versuchsbeginn, die Diffusionskoeffizienten vergleichbar. Erst die Hinzuziehung der im Alter von 400 Tagen durchgeführten Prüfungen der Beton-

deckung zeigt die Bedeutung des w/z-Werts auf. Im Vergleich von Wand AF zu BF bzw. AL zu BL führt die Zunahme des w/z-Werts von 0,5 auf 0,7 zu einer Verdoppelung des CO₂-Diffusionskoeffizienten des oberflächennahen Betons.

Diese Ergebnisse stimmen mit dem zuvor ermittelten Einfluß des w/z-Werts auf die diffundierbare Porosität ϵ_{diff} überein. Für die Wandmitte von Wand B ergab sich ein Wand A vergleichbarer Wert. Nur für die Randbereiche von Wand B ergaben sich wesentlich größere Werte für ϵ_{diff} und $r_{h,\text{diff}}$, so daß sich die im Berichtsteil C abgeleiteten Beziehungen zwischen Diffusion und Porenkennwerten bestätigen.

3.3.1.4 Einfluß der Sieblinie

Die Mörtelwände weisen in Wandmitte einen ca. 1,25-fach größeren Diffusionskoeffizienten als die BF-Wand auf. Erst ab einem Alter von mehr als 700 Tagen zeigen die Wände BF und D hinsichtlich ihrer Diffusionsdichtigkeit keine signifikanten Unterschiede mehr. Wie Bild D112 zeigt, ist für Wand D für alle Wandtiefen eine deutliche Abnahme des CO₂-Diffusionskoeffizienten mit zunehmendem Betonalter zu verzeichnen. Die Zunahme des Alters von 7 auf 700 Tage führt zu einer Zunahme der Diffusionsdichtigkeit um das 5-fache. Dies ist in diesem Ausmaß für die Betonwände nicht beobachtbar. Somit sind Mörtelwände hinsichtlich ihrer Porosität, Porenradienverteilung, Absorptions- und Diffusionsdichtigkeit wesentlich stärker zeitlichen Veränderungen als Betonwände gleicher Zusammensetzung und Nachbehandlung ausgesetzt. Dieser geringere Widerstand gegen Witterungseinflüsse zeigt sich u.a. in einer größeren Karbonatisierungstiefe.

3.3.1.5 Einfluß der Trocknungsart

Für die Proben aus der Wandmitte wurden gleichalte, benachbarte Proben zum einen bei 105 °C im Trockenschrank, zum anderen im Vakuum getrocknet. Unabhängig von weiteren Einflüssen bewirkt erstere gegenüber der Vakuumtrocknung mindestens eine Verdoppelung des CO₂-Diffusionskoeffizienten. Dies steht in Einklang mit der zuvor beobachteten Zunahme der Porosität infolge Trockenschranktrocknung. Da aber die Zunahme der Durchlässigkeit größer ausfällt als die der Porosität, hat die Trocknungsart auch Auswirkungen auf die Porenstruktur.

Dies hat Konsequenzen für die Dauerhaftigkeitsbeurteilung von zementgebundenen Baustoffen. Beruht diese auf der Prüfung von bei 105 °C getrockneten Proben, so führt dies zu einer Unterschätzung der Dauerhaftigkeit.

Da nur Versuche an Proben aus PZ-Betonen durchgeführt wurden, läßt sich nicht sagen, ob die hier festgestellte Verdoppelung des Diffusionskoeffizienten auf Hochofenzement übertragbar ist.

3.3.2 Ergebnisse der Versuchshäuser und der Kühlhauswand

Die Bilder D113 und D114 zeigen deutliche Unterschiede zwischen der Westwand von Haus 1 (PZ-Beton) und den Westwänden der Häuser 2 bis 4 (HOZ-Betone) auf. Auf Unterschiede zwischen den Häusern 2 bis 4 wird deshalb im folgenden nicht weiter eingegangen. Nur die karbonatisierten Randschichten von Haus 1 erreichen mit $D_{CO_2} \leq 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ die Dichtigkeit, die von HOZ-Betonen (mit Ausnahme der karbonatisierten Innenschicht der Tiefe 0 - 10 mm) i.d.R. unterschritten werden. Somit weist ein ca. 25 Jahre alter HOZ-Beton auch eine wesentlich höhere Diffusionsdichtigkeit auf, als ein vergleichbarer PZ-Beton.

Auffällig ist für den HOZ-Beton auch hier das unterschiedliche Verhalten der inneren und äußeren Oberflächenschicht. Nur die karbonatisierte Innenschicht der Tiefe 0 - 10 mm weist eine deutlich größere Durchlässigkeit als die restliche Wand auf. Diese ist für Haus 2 ($w/z = 0,45$, HOZ 275) doppelt so groß und für Haus 4 ($w/z = 0,58$, HOZ 275) ca. 3-mal so groß wie in Wandmitte und der Wandaußenseite (obwohl auch auf der Außenseite in beiden Fällen eine Karbonatisierungstiefe von $x_c \geq 10 \text{ mm}$ vorliegt). Somit ist die Feststellung einer karbonatisierungsbedingten Diffusionsdichtigkeitsabnahme von HOZ-Betonen, wenn diese unter dem ungeschützten Einfluß natürlicher Witterung stattfindet, nicht zutreffend. Analoge Feststellungen gelten für den Wasseraufnahmekoeffizienten. Die Abnahme der Dichtigkeit von karbonatisiertem HOZ-Beton ist somit abhängig von den äußeren Bedingungen (für ungeschützt der Witterung ausgesetzten Beton findet sie nicht statt), der Mahlfeinheit des Zements (je höher die Mahlfeinheit, desto geringer ist die Abnahme der Dichtigkeit) und dem w/z -Wert (je höher der w/z -Wert, desto größer ist die Abnahme der Dichtigkeit).

Auffällig ist weiterhin, daß die Diffusionskoeffizienten der drei HOZ-Häuser fast gleich groß sind, obwohl $\varepsilon_{\text{diff}}$ von Haus 2 nur halb so groß ist wie von Haus 3 bzw. Haus 4. Da D_{CO_2} bis auf die Tiefe 0 - 10 mm der Wandinnen-seite für alle übrigen Tiefen nahezu konstant ist, läßt sich an Hand des CO_2 -Diffusionskoeffizienten der Einfluß der Witterung im Wandinneren nicht nachweisen.

Ganz anders liegen dagegen die Verhältnisse bei Haus 1 (PZ-Beton). Deutlich erkennbar ist die Zunahme der Dichtigkeit infolge Karbonatisierung. Dabei ist der Dichtigkeitsgewinn auf der Außenseite weitaus größer als auf der Innenseite, obwohl die Karbonatisierungstiefe innen mit ca. 9 mm wesentlich größer ist als außen (ca. 1 - 2 mm). Somit führt auch für PZ-Betone die Karbonatisierung bei ungeschützter Witterungseinwirkung zu einer größeren Dichtigkeit.

Der wellenförmige Verlauf der Größe des CO_2 -Diffusionskoeffizienten über der Wandtiefe erklärt sich aus der unterschiedlichen "Einflußtiefe" der jeweiligen Witterung und der bei den Wänden A - D festgestellten Tatsache, daß die Dichtigkeit für ein Betonalter $t \leq 3$ Jahre in Wandmitte am größten ist.

Für die Kühlhauswände (Bild D115) sind drei Fälle zu unterscheiden. Die Bohrkerne 1 und 3 entstammen Wandbereichen oberhalb der Holzlamellen auf denen die Verregnung des Kühlwassers erfolgte, der Bohrkern 2 wurde einem Wandbereich unterhalb dieser Lamellen entnommen. Während der Bohrkern 3 einer Zwischenwand innerhalb der Kühlerumfassungswände entnommen wurde, stammen die Bohrkerne 1 und 2 aus der Außenwand des Kühlers.

Somit liegen nur für Bohrkern 3 auf beiden Wandseiten gleiche Beanspruchungen vor (Kühlerinnenklima oberhalb der Lamellen). Dennoch führt dies nicht auf vergleichbare Diffusionseigenschaften. Da hierfür keine befriedigende Erklärung gefunden werden konnte, wird auf die Ergebnisse von Bohrkern 3 nicht weiter eingegangen. Die kühlerbeanspruchte Oberfläche ($d = 15$ cm) von Bohrkern 1 weist gegenüber der witterungsbeanspruchten Außenseite ($d = 0$ cm) eine um $\Delta D \approx 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ größere Dichtigkeit auf, wobei der Verlauf des CO_2 -Diffusionskoeffizienten über der Wandtiefe nahezu linear ist. Nur für Bohrkern 2 führen die natürliche Witterung und die Kühlerbeanspruchung im Bereich unterhalb der Lamellen auf eine ungefähr gleich große

Dichtigkeit. Diese ist für die Wandaußenbereiche mehr als doppelt so groß wie für Bohrkern 1. Insgesamt sind somit die Ergebnisse dieser drei Bohrkern zu verschieden, um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können.

3.4 Gesamtporosität infolge Wassersättigung

Für die ca. 3 Jahre alten Proben der Wände A - D sowie an Proben aus den Versuchshäusern in Beckum wurde durch Wassersättigung unter Atmosphären- sowie Vakuumdruck die füllbare Porosität $\varepsilon_{\text{füll}}$ und die Gesamtporosität ε_{ges} ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Bildern D116 bis D129 wiedergegeben. Auf weitere Erläuterungen wird verzichtet.

4. AUSWERTUNG DER ZERSTÖRUNGSFREIEN BAUWERKSMESSUNGEN

4.1 Umfang der durchgeführten Auswertungen

Folgende Verfahren wurden eingesetzt: ISA-Verfahren nach BS 1881, pt. 5 und die Wassereindringprüfung in Anlehnung an das Verfahren von Karstens. Während im ISA-Versuch die Wassereindringgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Saugzeit gemessen wird, bestimmt die Wassereindringprüfung die zum Zeitpunkt t_s nach Saugbeginn eingedrungene Wassermenge. Der ISA-Wert ist somit identisch mit der Ableitung der Wassereindringmenge nach der Zeit. Deshalb wird auf die Ergebnisse der Wassereindringprüfung hier nicht weiter eingegangen.

Die Messungen dienen der Feststellung der aktuell am Bauwerk vorhandenen Absorptionsdichtigkeit. Diese setzt sich aus dem Dichtigkeitsanteil der Betonqualität und dem der momentanen Feuchte zusammen und ist zudem temperaturabhängig (siehe Berichtsteil C). Beide Dichtigkeitsanteile sind zeitabhängig. Die wirklichkeitsnahe Einschätzung der Dauerhaftigkeit erfordert Dichtigkeitsmessungen zu solchen Zeitpunkten, zu denen ein für die Karbonatisierung repräsentativer Erhärtungszustand und eine repräsentative Betonfeuchte vorliegen. Repräsentativ bezüglich der Erhärtung ist ein Alter von mehr als 3 Monaten (siehe Eignungsversuche der Wände I - VIII). Bezüglich des Feuchteinflusses wird davon ausgegangen, daß die Regelung frühestens 2 Tage nach dem letzten Regen zu prüfen, dies berücksichtigt.

Es ist ausreichend, sich auf die ISA_{10} -Werte zu beschränken, da die Wassereindringgeschwindigkeit mit zunehmender Versuchsdauer überproportional abnimmt und Unterschiede infolge Variation betontechnologischer Parameter zwangsläufig mit zunehmender Versuchsdauer geringer ausfallen und mit geringerer Signifikanz erkennbar sind. Zu beachten ist die zu diesem Zeitpunkt geringe Eindringtiefe, von ca. 1 - 10 mm.

Die bisherigen Dichtigkeitsuntersuchungen ergaben, daß sowohl der Wasseraufnahmekoeffizient als auch der CO_2 -Diffusionskoeffizient durch die Karbonatisierung signifikant beeinflusst werden und daß der Beton nicht als über die Wanddicke gleichförmiger Baustoff anzusehen ist. Wenn ISA-Messungen an einem Beton durchgeführt werden, dessen Karbonatisierungstiefe in der Größenordnung der Wassereindringtiefe liegt, so sind zwei Fälle zu unterscheiden:

Fall a) Die Karbonatisierungstiefe ist größer als die Eindringtiefe

Die Messung erfolgt zu einem Betonalter, zu dem die Hydratation nahezu abgeschlossen ist. Der weitere Karbonatisierungsfortschritt kann keine wesentliche Veränderung des Meßwerts bewirken. Es ist deshalb nicht möglich mit dem ISA_{10} -Wert direkt den Karbonatisierungsfortschritt vorherzusagen, da trotz zunehmender Karbonatisierungstiefe der ISA_{10} -Wert konstant bleibt. Der gemessene ISA_{10} -Wert ist charakteristisch für die Dichtigkeit des karbonatisierten Betons. Gemessen wird die für den weiteren Karbonatisierungsfortschritt maßgebende Dichtigkeit.

Fall b) Die Karbonatisierungstiefe ist kleiner als die Eindringtiefe

Die gemessene Dichtigkeit ist ein Wert, der sich je nach dem Verhältnis von Karbonatisierungs- zu Eindringtiefe aus den Eigenschaften des karbonatisierten und noch nicht karbonatisierten Betons zusammensetzt, und der sich mit zunehmender Karbonatisierung verändern wird. Diese Veränderung bewirkt je nach Zementart und äußerer Bedingung eine Zu- bzw. Abnahme der Dichtigkeit. Der gemessene ISA_{10} -Wert repräsentiert noch nicht jene charakteristische Dichtigkeit, mit der die Dauerhaftigkeit prognostiziert werden kann, sondern einen Wert der sich mit zunehmendem Verhältnis von Karbonatisierungs- zu Eindringtiefe in Richtung dieser Dichtigkeit entwickelt.

4.2 Ergebnisse der Messungen auf den Oberflächen der Wände A - D (Bilder D130 bis D133)

Dem Einfluß der Lagerungsbedingungen auf den ISA_{10} -Wert kommt eine wesentliche Bedeutung zu, da unterschiedlich gelagerte Wände verschiedene Feuchtegehalte im Oberflächenbereich aufweisen können. Schon aus diesem Grund weisen die L-Wände deren Feuchtegehalt i.d.R. sehr viel niedriger ist als jener der F-Wände, bei gleichen Betonalter erheblich größere ISA_{10} -Werte auf (Bild D130 bzw. D131). Da aber auch bei den Messungen im Alter von ca. 400 Tagen, zu denen die im Freien aufgestellten Wände zwecks Feuchteangleichung eine Woche in das Labor gestellt wurden, deutliche Dichtigkeitsunterschiede vorhanden sind, können diese nicht nur dem Feuchteeinfluß zugeschrieben werden. Bei Wandpaar A weist die im Freien gelagerte Wand einen ca. 5-fach geringeren, bei Wandpaar B eine ca. 1,5-fach geringeren ISA_{10} -Wert im Vergleich zur jeweiligen Laborwand auf. Damit erreichen diese Unterschiede eine Größenordnung, die nur durch die Differenzen in den transportrelevanten Porenkennwerten nicht erklärt werden können. Außerdem ist die Wechselwirkung von Lagerungsbedingung und Erhärtungszustand nicht vernachlässigbar.

Auf Bild D133 sind für Wand BF zusätzlich zu den Ergebnissen der Messungen auf der nach Süden weisenden Oberfläche die Ergebnisse der nach Norden orientierten Oberfläche angegeben. Für die Messungen im Alter von ca. 400 Tagen ergibt sich infolge der vorausgehenden Zwischenlagerung im Versuchskeller kein Unterschied zwischen den unterschiedlich orientierten Wandhälften. Bei den zu späteren Zeitpunkten durchgeführten Messungen liegen die Ergebnisse der Nordseite i.d.R. am oberen Ende des Streubandes der Südseite.

Der Einfluß der Nachbehandlung läßt sich für ein Prüfalter von i.d.R. mehr als 400 Tagen nicht mehr nachweisen. Allenfalls bei den Wänden BL (Bild D131, unten) und D (Bild D132) ist der ISA_{10} -Wert der nicht nachbehandelten Wandhälfte auch nach mehr als einem Jahr größer als der der nachbehandelten Wandhälfte.

Zur Ermittlung der Einzeleinflüsse und Wechselwirkungen wurden mittels einer multiplen Regression die Effekte folgender Parameter untersucht:

- a) Betonalter (quantitativer Parameter, Wertebereich: 400 - 1400 Tage)

- b) w/z-Wert (quantitativer Parameter, Wertebereich: 0,5 - 0,7)
- c) Lagerungsbedingung (qualitativer Parameter, Werte: Laborlagerung und ungeschützt im Freien)

Eine Zusammenstellung der Eingabewerte enthält Tab. D6. Den Versuchen lag keine statistische Versuchsplanung zugrunde. Ebenso ist das quantitative Ergebnis in Form des Regressionspolynoms hier nicht von Interesse. Der Korrelationskoeffizient ergab sich zu $r^2 = 0,96$. Im einzelnen läßt sich feststellen (Bild D136):

- a) Das Betonalter hat nur einen geringen Einfluß auf den ISA_{10} -Wert. Steigert man das Betonalter von 400 auf 1400 Tage, so verringert sich der ISA_{10} -Wert i.M. um ca. $0,04 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Stärker sind die Wechselwirkungen mit den übrigen beiden Parametern. Während diese Alterssteigerung für die L-Wände, sowie die Wände des Wandpaares A ($w/z = 0,5$) zu einer geringfügigen Erhöhung des ISA_{10} -Werts führt, ergibt sich für Wandpaar B ($w/z = 0,7$) eine Reduktion des ISA_{10} -Werts um ca. $0,08 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ und für die im Freien aufgestellten Wände eine solche von ca. $0,10 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (auch dies gilt insbesondere für Wand BF).
- b) Sowohl eine Erhöhung des w/z-Werts von 0,5 auf 0,7 als auch ein Wechsel des Aufstellortes von ungeschützt im Freien zu Laborbedingungen führt zu einer Zunahme des ISA_{10} -Werts um ca. $0,20 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Mit zunehmendem Betonalter nimmt der Einfluß des w/z-Werts ab, jener der äußeren Lagerungsbedingungen dagegen zu:
 - Steigert man den w/z-Wert von 0,5 auf 0,7 so ist der ISA_{10} -Wert nach 400 Tagen um ca. $0,22 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ größer, nach 1400 Tagen dagegen nur noch um ca. $0,15 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ größer.
 - Während die im Labor aufgestellten Wände nach 400 Tagen einen gegenüber den im Freien aufgestellten Wänden um ca. $0,16 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ größeren ISA_{10} -Wert aufweisen, ist dieser nach 1400 Tagen ca. $0,28 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ größer.

Aus dieser Analyse kann man folgende wesentliche Erkenntnisse ableiten:

- a) Im Mittel der hier untersuchten Fälle ist die Veränderung der Betoneigenschaften bis zu einem Alter von 400 Tagen näherungsweise abgeschlossen.
- b) Für qualitativ schlechtere Betone (hier $w/z = 0,7$) die ungeschützt der Witterung ausgesetzt sind, sind Veränderungen der Dichtigkeit signifikant nachweisbar. Mit zunehmendem Alter verbessert sich die Dichtigkeit hin zu jener von Betonen mit niedrigerem w/z -Wert.

Abschließend wird im Bild D137 auf den Einfluß der Karbonatisierung eingegangen. Im unteren Teil des Bildes sind die gemessenen mittleren Karbonatisierungstiefen und im oberen Teil die gemittelten ISA_{10} -Werte über der Zeit dargestellt.

Grundsätzlich ergibt sich mit zunehmender Karbonatisierungstiefe ein abnehmender ISA_{10} -Wert. Auch ist die Karbonatisierungstiefe umso geringer bzw. der Karbonatisierungsfortschritt umso langsamer, je geringer der ISA_{10} -Wert vor Beginn der Karbonatisierung bzw. im Zustand geringer Karbonatisierungstiefe ist.

Für die exemplarisch herausgegriffene Wand BL läßt sich der zuvor angesprochene Einfluß des Verhältnisses Karbonatisierungstiefe zu Eindringtiefe nachweisen. Nach ca. 600 Tagen ist eine mittlere Karbonatisierungstiefe von ca. 5 mm erreicht. Für höhere Alter verändert sich trotz steigender Karbonatisierung der ISA_{10} -Wert nur noch unwesentlich. Somit ist Fall a) von Abschn. 4.1 eingetreten und die Wassereindringtiefe kleiner als 5 mm, so daß sich die Prüfung nur auf den bereits karbonatisierten Bereich beschränkt (Ein ähnliches Verhalten deutet sich auch für die Mörtelwand D an).

4.3 Ergebnisse der ISA-Messungen an den Versuchshäusern

In den Bildern D134 und D135 sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengestellt. Bei den Versuchshäusern 2 bis 4 wurde bezüglich des CO_2 -Diffusionskoeffizienten eine unterschiedliche Dichtigkeit des inneren bzw. äußeren oberflächennahen, karbonatisierten Betons festgestellt. Dies gilt in viel stärkerem Maße auch für die ISA_{10} -Werte. Obwohl für beide Oberflächen die vorhandene Karbonatisierungstiefe wesentlich größer ist als die Wassereindringtiefe, sind die ISA_{10} -Werte unabhängig von der Wandorientierung für

die äußeren Seiten wesentlich kleiner als auf der Wandinnenseite (siehe Bilder D134 und D135). Dabei fällt besonders Haus 4 mit im Vergleich zu den übrigen Häusern extrem großen ISA_{10} -Werten auf.

5. KORRELATION DER ERGEBNISSE

Ein wesentliches Forschungsziel stellt die Korrelation von

- a) Ergebnissen der Porositätsmessung (Porenradienverteilungen) mit den Ergebnissen der Dichtigkeitsmessungen (Abschnitt 5.1)
- b) Kennwerten der Porenradienverteilung untereinander (Abschnitt 5.2)
- c) Transportkoeffizienten der verschiedenen Transportarten untereinander (Abschnitt 5.3)

dar. Mit dieser Korrelation werden folgende Absichten verfolgt:

- 1) Bestimmung des Einflusses der Porenstruktur auf die Dichtigkeit des Betons in Abhängigkeit wesentlicher betontechnologischer Parameter.
- 2) Verifikation der Ableitungen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Porenradienverteilung und Transportgeschehen (siehe Berichtsteil C, Abschn. 3, 5 und 6).
- 3) Ermittlung der Regressionskoeffizienten des Dauerhaftigkeitsmodells.

5.1 Korrelation von Porenkennwerten und Dichtigkeit

In Abschn. 3 von Berichtsteil C wurde die Proportionalität zwischen den Transportkoeffizienten und den transportrelevanten Teilporositäten unter Beachtung des transportartabhängigen Einflusses des Porenradius abgeleitet. Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich als Kehrwert des Porenstrukturfaktors a_t . Der Einfluß der Feuchte ist in diesen Ableitungen nicht enthalten.

Im Rahmen dieses Vorhabens sind nur die Bauteilmessungen (ISA_{10} -Werte) vom Feuchtegehalt des Betons beeinflusst, da eine versuchsvorbereitende Trocknung der Betonoberflächen nicht erfolgte. Eine versuchsbegleitende Messung

des Feuchtegehalts erfolgte ebenfalls nicht. Deshalb kann der Feuchteeinfluß auch bei diesen Messungen nicht explizit berücksichtigt werden. Implizit ergibt er sich aus dem Unterschied des Porenstrukturfaktors der Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme (getrocknete Proben) und der ISA-Versuche (feuchte Wandoberfläche nach 2 Tagen Regenfreiheit).

5.1.1 Einfluß der Porenstruktur auf die Korrelation von Porosität und Dichtigkeit

Nicht für alle Einflüsse waren Veränderungen der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung mit entsprechenden Veränderungen im Transportverhalten gekoppelt, da von einem idealisiertem Porenmodell ausgegangen wurde. Von einer idealisierten Struktur gehen keinerlei zusätzliche Transportwiderstände aus, wie sie in der realen Porenstruktur des Betons auftreten. Aber auch diese unterliegen dem Einfluß betontechnologischer und sonstiger Parameter.

Es ist somit zu überprüfen, wie die Proportionalität zwischen Porenkennwerten und Transportkoeffizienten von diesen Parametern beeinflusst wird. Dazu werden in den folgenden Bildern auf der Abzisse die mittels der transportrelevanten Kennwerte berechneten Transportkoeffizienten und auf der Ordinate die gemessenen Transportkoeffizienten aufgetragen. Es ergibt sich eine Regressionsgerade, deren Steigung dem Kehrwert des Porenstrukturfaktors a_t entspricht:

$$a_t = \frac{\text{berechneter Transportkoeffizient}}{\text{gemessener Transportkoeffizient}} = \frac{D_{\text{ber.}}}{D_{\text{gem.}}} \quad (\text{D4})$$

bzw:

$$D_{\text{gem.}} = \frac{1}{a_t} \cdot D_{\text{ber.}} \quad (\text{D5})$$

Außerdem wird überprüft ob der Porenradius r und die labyrinthartige Verflechtung der Poren voneinander abhängen. Die maximal mögliche Anzahl von Porenverzweigungen oder die maximal mögliche Umweglänge nimmt mit abnehmendem Porenradius zu. Es ist deshalb davon auszugehen, daß gilt:

$$a_{t,abs} < a_{t,diff} \quad (D6)$$

5.1.2 Einflüsse auf die Porenstruktur

5.1.2.1 Korrelation von Wasseraufnahmekoeffizient und Absorptionsprodukt

Die Bilder D138 bis D140 zeigen die Korrelation des Absorptionsprodukts $\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs}$ mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten der Wände A - D. Für die oberflächennahen Proben wurde dabei für das Absorptionsprodukt der Mittelwert aus den Tiefen 0 - 10 und 10 - 20 mm, für den Wasseraufnahmekoeffizient die Ergebnisse der Proben des Entnahmebereichs 0 - 50 mm herangezogen. Außerdem ist die Beziehung zwischen Wasseraufnahmekoeffizient und Absorptionsprodukt des Idealporenmodells ($a_t = 1,0$) eingezeichnet.

Es wird dem Einfluß folgender Parameter nachgegangen:

- Lagerungsbedingung (Bild D139)
- Nachbehandlung (Bild D139)
- Betonzusammensetzung (Bild D139)
- Wandtiefe (Bild D139 und D140)
- Betonalter (Karbonatisierung) (Bild D138 und D139).

Nicht für alle diese Parameter läßt sich ein Einfluß auf die Porenstruktur nachweisen. Dies zeigt insbesondere Bild D139. Die Ergebnisse lassen sich durch vier Regressionsgeraden beschreiben. Es ergeben sich jeweils eigene Porenstrukturen für die im Freien und im Labor aufgestellten Wände. Außerdem ist das Betonalter bzw. die Karbonatisierung zu beachten. Der Porenstruktur ist ein umso größerer Transportwiderstand zuweisbar, je weiter die Karbonatisierung vorangeschritten ist und je ungeschützter der Beton der natürlichen Witterung ausgesetzt ist. Nur die Parameter Lagerungsbedingung, Alter und Wandtiefe (siehe zusätzlich Bild D140) haben Einfluß auf die Porenstruktur. Die Werte unterschiedlich nachbehandelter und zusammengesetzter Betone liegen dagegen jeweils auf einer Regressionsgeraden. Dabei geht der Einfluß der Nachbehandlung und der Sieblinie in der Streuung der Werte unter. Für $w/z = 0,5$ liegen alle Werte links von einer Senkrechten durch $\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs} \approx 0,075 \sqrt{\text{cm}} \cdot \text{cm}^3/\text{kg}$, für $w/z = 0,7$ rechts davon (Bild D139). Innerhalb einer durch das Betonalter (Karbonatisierung), die Wand-

tiefe (Herstellungseinflüsse) und die äußeren Witterungsbeanspruchung vorgegebenen Porenstruktur, üben nur diese Parameter einen Einfluß auf das Absorptionsprodukt aus.

Die Bilder D141 und D142 zeigen entsprechende Ergebnisse der Versuchshäuser in Beckum. Die Werte gruppieren sich um die zum Vergleich eingezeichnete Gerade der F-Wände des Betonalters >400 Tage. Diese Feststellung ist unabhängig von der Wandtiefe und der Zementart. Der PZ-Beton von Haus 1 weist dabei das größte Absorptionsprodukt aller vier Häuser auf.

Somit ist hinsichtlich der Porenstruktur zwischen dem oberflächennahen Beton der 2 - 3 Jahre alten Wände A - D und dem ca. 25 Jahre alten Beton der Versuchshäuser kein wesentlicher Unterschied vorhanden.

5.1.2.2 Korrelation des ISA_{10} -Wertes mit dem Absorptionsprodukt

Im Bild D143 ist über dem Absorptionsprodukt der Wandtiefe 0 - 10 mm der zugehörige ISA_{10} -Wert aufgetragen. Analog zu den Ausführungen über den Wasseraufnahmekoeffizienten ergibt sich eine deutliche Trennung zwischen den Oberflächen der im Freien und der im Labor aufgestellten Wände. Der Einfluß des Alters auf die Porenstruktur ist weniger deutlich. Dies gilt insbesondere für die Laborwände.

Regressionsrechnungen zur Bestimmung des Porenstrukturfaktors werden zum einen für alle Ergebnisse der Laborwände und zum anderen für die Werte des mehr als 400 Tage alten Betons der im Freien aufgestellten Wände durchgeführt. Dies geschieht für die beiden Fälle

$$ISA_{10} = a_0 \cdot (\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs}) \quad (D7)$$

und

$$ISA_{10} = a_0 + b_0 (\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs}). \quad (D8)$$

Beide Regressionsgeraden sind in Bild D143 eingezeichnet (ε_{abs} in $[cm^3/kg]$; $r_{h,abs}$ in $[cm]$). Die daraus ermittelten Porenstrukturfaktoren stimmen in etwa mit denen der Regression Wasseraufnahmekoeffizient - Absorptionsprodukt überein.

Bild D144 zeigt entsprechende Ergebnisse der Versuchshäuser in Beckum. Hierbei kann eine deutliche Trennung zwischen dem PZ-Beton von Haus 1 und den HOZ-Betonen der Häuser 2 bis 4 vorgenommen werden. Durch die wesentlich feinere Porenstruktur des Betons von Haus 1 wird dessen wesentlich größere Porosität und gröbere Porenradienverteilung ausgeglichen, so daß der PZ-Beton geringere ISA_{10} -Werte als die HOZ-Betone aufweist.

Für die Lagerungsbedingung "ungeschützt im Freien" (Wandaußenseite) ergeben sich die jeweils dichtesten Porenstrukturen. Somit zeigt der ISA-Test auf, daß jeweils eigene Porenstrukturen in Abhängigkeit der Zementart und der Lagerungsart entstehen. Auf Grund der wenigen vorliegenden Werte wird auf die Bestimmung des Porenstrukturfaktors verzichtet.

Vergleicht man die Ergebnisse der Wände A - D mit denen der Versuchshäuser (siehe die in Bild D144 eingezeichneten Regressionsgeraden für die L- und F-Wände), so zeigt Haus 1 (PZ-Beton) eine wesentlich dichtere Porenstruktur als die mehr als 400 Tage alten F-Wände. Die HOZ-Betone der Häuser 2 bis 4 weisen dagegen eine Porenstruktur auf, die eher mit jener der L-Wände vergleichbar ist.

Bei den ISA-Versuchen zeigen sich die Einflüsse betontechnologischer Parameter sowie jene der Witterung auf die Dauerhaftigkeit und Betonqualität wesentlich deutlicher, als bei der Laborprüfung zur kapillaren Wasseraufnahme an z.B. 5 cm hohen Proben.

5.1.2.3 Korrelation von D_{CO_2} mit dem Diffusionsprodukt

Bild D145 zeigt den Zusammenhang zwischen Porosität und CO_2 -Diffusion für alle im Vakuum getrockneten Proben die den Wänden A - D entnommen wurden. Unterschiedliche Entnahmebereiche und Alter sind gekennzeichnet.

Oberflächennah entnommene Proben (Entnahmetiefe 0 - 20 mm), Proben aus der Wandmitte, Proben des Alters $t \leq 400$ Tage sowie des Alters $t > 400$ Tage lassen sich durch eigene Porenstrukturfaktoren abgrenzen. Die dichteste Porenstruktur weisen dabei die mehr als 400 Tage alten Proben auf, wobei die oberflächennahen Proben geringfügig dichter sind als die der Wandmitte.

Bild D146 geht dem Einfluß der verschiedenen Lagerungsverhältnisse für oberflächennahe Proben des Alters $t > 400$ Tage nach. Es ergeben sich folgende Porenstrukturfaktoren:

- Wände im Freien: $a_{t,diff} = 19,30$
- Laborwände : $a_{t,diff} = 11,25$.

Auch für die Diffusion haben nur die Parameter Lagerungsbedingung, Alter (Karbonatisierung) und Wandtiefe signifikanten Einfluß auf die Porenstruktur, während die Parameter Betonzusammensetzung und Nachbehandlung nur die Größe des Diffusionsprodukts beeinflussen.

Die Ergebnisse der Versuchshäuser sind in Bild D147 wiedergegeben. Analog zu den bisherigen Feststellungen liegen auch hier Porenstrukturen vor, die denjenigen der Wände A - D vergleichbar sind. Dies bestätigt die Vermutung, daß nach einem Alter von mehr als 400 Tagen die Porenstruktur soweit stabilisiert ist, daß nur die Karbonatisierung, aber nicht sonstige Witterungseinflüsse diese noch nennenswert beeinflussen. Es ist grundsätzlich möglich, Betone unterschiedlichen Alters, die mit z.T. anderen Ausgangsstoffen hergestellt wurden, hinsichtlich ihrer Dichtigkeit und ihres Porensystems zu vergleichen. Somit können die hier aus Versuchen an den Wänden A - D abgeleiteten Beziehungen zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung älterer Betone benutzt werden, sofern deren betontechnologischen Parameter jenen der Wände vergleichbar sind (z.B. w/z zwischen 0,5 und 0,7; PZ).

Die Korrelation zwischen $K(r_{h,diff}) \cdot \varepsilon_{diff}$ und dem CO_2 -Diffusionskoeffizienten ergibt zudem die Möglichkeit der Beurteilung des Karbonatisierungsfortschritts allein aufgrund von Aussagen der Porenradienverteilung, wenn die Werte des Porenstrukturfaktors bekannt bzw. sinnvoll abgeschätzt werden können (näheres siehe Abschn. 6.1.1).

5.2 Korrelation der transportrelevanten Porenkennwerte

Im Berichtsteil C, Abschn. 6.2, wurde an Hand von Literaturangaben überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den beiden transportrelevanten Teilporositäten ε_{abs} und ε_{diff} besteht. Dies wird hier für die Versuchsergebnisse untersucht. Darüberhinaus werden die Zusammenhänge zwischen den hydraulischen Radien, zwischen dem Diffusionsprodukt und dem Absorptionsprodukt,

der Wasserkapazität und der kapillar wirksamen Porosität sowie zwischen den Porenstrukturfaktoren der Absorption und der Diffusion betrachtet.

Wie die weiteren Ausführungen zeigen, gilt bei konstanten Randbedingungen folgender allgemeiner Zusammenhang:

$$\varepsilon_{\text{diff}} = a + b \cdot \varepsilon_{\text{abs}} \quad (\text{D9})$$

mit a und b als Regressionskoeffizienten, die von den Randbedingungen sowie z.T. von den zuvor besprochenen betontechnologischen Parametern abhängen. Somit ist:

$$D_{\text{CO}_2} = f(\varepsilon_{\text{diff}}) = g(\varepsilon_{\text{abs}}) = h(\text{ISA}_{10}) \quad (\text{D10})$$

5.2.1 Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten

In Bild D148 sind die Werte von ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ aller sechs Wände A - D aller Alter und Wandtiefen dargestellt. Neben dem linearen Zusammenhang zwischen ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$, läßt sich der Einfluß der Betonzusammensetzung erkennen. Der w/z-Wert 0,5 führt unabhängig von den übrigen Parametern auf $\varepsilon_{\text{abs}} < 14 \text{ cm}^3/\text{kg}$. Die Verringerung des Größtkorndurchmessers von 16 auf 2 mm ergibt, daß - bei Betrachtung gleich großer Werte für ε_{abs} - der Anteil der Poren des Radienbereichs 30 - 100 nm ($\varepsilon_{\text{diff}} - \varepsilon_{\text{abs}}$) zunimmt, und somit $\varepsilon_{\text{diff}}$ insgesamt größer wird.

Näheren Aufschluß über die Parameter Lagerungsbedingung und Nachbehandlung geben die Bilder D149 (F-Wände) und D150 (L-Wände). Es sind nur die Werte der Schicht 0 - 10 mm berücksichtigt. In beiden Fällen lassen sich die Werte jeweils durch eine Regressionsgerade beschreiben. Ein Einfluß der Nachbehandlung ist dabei nicht erkennbar. Auch das Betonalter (Nachhydratation und Karbonatisierung) spielt keine Rolle. Plausible Gründe können hierfür nicht angegeben werden. Offenbar ist die Abnahme von Poren des Radienbereichs 30 - 100 nm infolge Nachhydratation und die Abnahme der Poren $r > 100 \text{ nm}$ infolge Karbonatisierung so, daß davon die lineare Beziehung zwischen ε_{abs} und $\varepsilon_{\text{diff}}$ nicht betroffen ist.

Die Regressionsgeraden für den oberflächennahen Beton lauten ($[\text{cm}^3/\text{kg}]$):

- F-Wand

$$\varepsilon_{\text{diff}} = 7,17 + 1,346 \cdot \varepsilon_{\text{abs}}; \quad r^2 = 0,85 \quad (\text{D11})$$

- L-Wand

$$\varepsilon_{\text{diff}} = 17,15 + 0,968 \cdot \varepsilon_{\text{abs}}; \quad r^2 = 0,92 \quad (\text{D12})$$

Wie Bild D151 oben zeigt, gelten auch für den Beton der Versuchshäuser in Beckum lineare Beziehungen zwischen $\varepsilon_{\text{diff}}$ und ε_{abs} .

5.2.2 Korrelation der transportrelevanten Porenradien

Analog zu dem Vorgehen bei den transportrelevanten Teilporositäten erfolgt in den Bildern D151 unten und D152 bis D154 die Darstellung der hydraulischen Porenradien des Betons der Wände A bis D. Eine Korrelation ist nicht erkennbar. Im einzelnen wird deshalb nicht näher auf die Ergebnisse eingegangen.

5.2.3 Korrelation des Absorptions- und Diffusionsprodukts

Es wird untersucht, ob zwischen dem Absorptions- und Diffusionsprodukt der Porenradienverteilung eine von den hier untersuchten Parametern unabhängige, allgemeingültige Korrelation besteht. Wie die Bilder D155 und D156 für die Wände A bis D und Bild D157 für die Versuchshäuser zeigen, ist dies der Fall.

Es ergibt sich für die Wände A bis D und die Versuchshäuser - trotz der Unterschiede in den betontechnologischen Parametern und den Witterungsbedingungen und Einwirkungsauern - eine einheitliche lineare Beziehung zwischen dem Absorptions- und Diffusionsprodukt. Auf dieser Grundlage kann das in Berichtsteil C abgeleitete vorläufige Dauerhaftigkeitsmodell vervollständigt werden. Es ergeben sich folgende Regressionsgeraden (Absorptionsprodukt in $[\sqrt{\text{cm}} \cdot \text{cm}^3/\text{kg}]$; Diffusionsprodukt in $[\text{m}^2/\text{h}]$) :

- Wände A bis D:

$$K(r_{h,\text{diff}}) \cdot \varepsilon_{\text{diff}} = 2,74 \cdot 10^{-4} + 0,0166 (\sqrt{2 r_{h,\text{abs}}} \cdot \varepsilon_{\text{abs}}); \quad r^2 = 0,86$$

- Versuchshäuser in Beckum:

$$K(r_{h,\text{diff}}) \cdot \varepsilon_{\text{diff}} = 1,31 \cdot 10^{-4} + 0,0150 (\sqrt{2 r_{h,\text{abs}}} \cdot \varepsilon_{\text{abs}}); \quad r^2 = 0,91$$

- für alle Werte zusammen

$$K(r_{h,diff}) \cdot \varepsilon_{diff} = 2,68 \cdot 10^{-4} + 0,0160 (\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs}); r^2 = 0,84$$

Diese drei Regressionsgeraden sind in Bild D155 mit eingezeichnet.

5.2.4 Korrelation der Wasserkapazität mit der kapillar wirksamen Porosität

Bild D158 zeigt die Korrelation der Wasserkapazität mit ε_{abs} für Wandpaar A und B getrennt nach den Lagerungsbedingungen, Bild D159 entsprechende Ergebnisse aller Wände getrennt nach dem Alter. Dabei ist die Wasserkapazität der 5 cm hohen Proben der Tiefe 0 - 50 mm der mittleren kapillar wirksamen Porosität der Tiefen 0 - 10 mm und 10 - 20 mm gegenübergestellt. Außerdem ist in beiden Bildern die Linie für den Fall $\psi = \varepsilon_{abs}$ (unter Beachtung der unterschiedlichen Einheiten und für eine Betontrockenrohddichte von 2.250 kg/m^3) eingetragen.

Für die 7 bis 90 Tage alten Proben und die im Labor aufgestellten Wände ergibt sich keine Übereinstimmung zwischen Wasserkapazität und kapillar wirksamer Porosität. Somit trifft für die oberflächlich am schlechtesten hydrtisierten Betone die Gleichsetzung von Wasserkapazität und kapillar wirksamer Porosität nicht zu. Eine nähere Begründung hierfür konnte nicht gefunden werden.

Auf die Wiedergabe der Ergebnisse der Versuchshäuser wird verzichtet.

5.2.5 Korrelation der Porenstrukturfaktoren der Diffusion und Absorption

In Bild D160 sind die Porenstrukturfaktoren der unterschiedlichen Transportarten gegeneinander aufgetragen. Dies erfolgte getrennt für die drei Fälle

- a) $a_{t,diff} - a_{t,abs}$ der Saugversuche an Proben der Wandmitte
- b) $a_{t,diff} - a_{t,abs}$ der Saugversuche an oberflächennah entnommenen Proben
- c) $a_{t,diff} - a_{t,abs}$ der ISA₁₀-Versuche (Probentiefe 0 - 10 mm)

Für den Fall c) wurde die zugehörige Regressionsgerade ermittelt und der Geraden $a_{t,diff} = a_{t,abs}$ gegenübergestellt. Dabei bestätigt sich die Vermu-

tung $a_{t,diff} > a_{t,abs}$ nicht. Außerdem ist ein deutlicher Unterschied bei der Korrelation der Porenstrukturfaktoren Diffusion - kapillare Wasseraufnahme und Diffusion - ISA_{10} -Wert zu erkennen, wenn die Werte des 7 bzw. 28 Tage alten Mörtels von Wand D mit berücksichtigt werden. Für die mehr als 400 Tage alten Proben ist dagegen kein Unterschied hinsichtlich der Versuchsart zur kapillaren Wasseraufnahme vorhanden.

Die Korrelation der Porenstrukturfaktoren aus D_{CO_2} und ISA_{10} für Fall c) ergibt folgende Regressionsgerade:

$$a_{t,diff} = 11,82 + 0,31 \cdot a_{t,abs}; r^2 = 0,51$$

Die Streuung der Werte ist so groß, daß die Einflüsse der betontechnologischen Parameter nicht erkannt werden können. Die indirekte Art der Bestimmung der Porenstrukturfaktoren aus einem Vergleich von Porositätsmessungen und Transportversuchen dürfte zu einem großen Teil dafür verantwortlich sein. Bild D161 zeigt die entsprechenden Ergebnisse der Versuchshäuser.

5.3 Korrelation der Transportkoeffizienten der unterschiedlichen Transportarten

Es wird nur auf die Beziehung zwischen dem CO_2 -Diffusionskoeffizienten und dem ISA_{10} -Wert eingegangen. Korrelationen zwischen den Kennwerten

- Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität
- Wasseraufnahmekoeffizient und CO_2 -Diffusionskoeffizient
- Wasserkapazität und ISA_{10} -Wert

die sich aus den Ausführungen des Berichtsteils C ebenfalls ableiten ließen, werden nicht durchgeführt. Bei der Korrelation zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und dem ISA_{10} -Wert wird nur überprüft, ob die Versuchsergebnisse dem physikalischen Zusammenhang entsprechen.

Entsprechend der in Abschn. 5.2 abgeleiteten Beziehung zwischen dem Diffusions- und dem Absorptionsprodukt und den Ableitungen von Abschnitt 3.1.2.3 (Berichtsteil C) ergibt sich eine theoretische Beziehung zwischen der Größe der Transportkoeffizienten D_{CO_2} und ISA_{10} . Dieser werden die Meßwerte gegenübergestellt.

5.3.1 Korrelation Wasseraufnahmekoeffizient und ISA_{10} -Wert

Die Bilder D162 und D163 zeigen die Ergebnisse für die Wände A bis D (Alter: ≥ 400 Tage) zum einen getrennt nach dem Alter (Bild D162), zum anderen getrennt nach der Lagerungsbedingung (Bild D163).

Wenn man von einigen Ausreißern absieht (L-Wände, Alter ca. 1000 Tage), so bestätigen die Ergebnisse den abgeleiteten physikalischen Zusammenhang:

$$A = 0,34 \cdot ISA_{10}.$$

Dies trifft prinzipiell auch für die Versuchsergebnisse der Versuchshäuser (Bild D164) zu.

5.3.2 Korrelation CO_2 -Diffusionskoeffizient und ISA_{10} -Wert

Die Korrelation D_{CO_2} und ISA_{10} (Bilder D165 und D166), ist vor dem Hintergrund der bisherigen Ableitungen zu sehen.

Mit Gl.(C28) (Berichtsteil C, Abschn. 6.2) und der im Abschn. 5.2.3 abgeleiteten Beziehung zwischen dem Absorptions- $[\sqrt{cm} \cdot cm^3/kg]$ und Diffusionsprodukt $[m^2/h]$

$$K(r_{h,diff}) \cdot \varepsilon_{diff} = a_1 + a_2 (\sqrt{2} r_{h,abs} \cdot \varepsilon_{abs}), \quad (D11)$$

sowie der im Abschn. 5.2.5 abgeleiteten Beziehung zwischen den Porenstrukturfaktoren

$$a_{t,diff} = b_1 + b_2 \cdot a_{t,abs}, \quad (D12)$$

erhält man:

$$\begin{aligned} D_{CO_2} &= \frac{a_1}{b_1 + b_2 \cdot a_{t,abs}} + \frac{a_2 \cdot a_{t,abs}}{k_3 (b_1 + b_2 \cdot a_{t,abs})} \cdot ISA_{10} \\ &= c_1 + c_2 \cdot ISA_{10}. \end{aligned} \quad (D13)$$

Dieser Zusammenhang ist in den Bildern D165 und D166 eingezeichnet. Die Tab. D7 enthält die dazu erforderlichen Angaben über die einzusetzenden

Konstanten. Die Übereinstimmung zwischen den mit Gl. (D13) vorhergesagten Werten und den Meßwerten ist gut. Aufgrund der wenigen vorliegenden Meßwerte wird auf Einzelheiten nicht eingegangen. Da sich für die Korrelation von $a_{t,abs}$ mit $a_{t,diff}$ nur ein Korrelationskoeffizient von 0,51 ergab, werden zur Absicherung der Aussagekraft von Gl.(D13) im Abschn. 6.3 nähere Untersuchungen durchgeführt.

Einflüsse infolge Nachbehandlung und Betonzusammensetzung brauchen für die obige Korrelation nicht weiter unterschieden zu werden. Für die mehr als 400 Tage alten Proben ergibt sich nur eine Trennung hinsichtlich der Lagerungsbedingung (entsprechend der unterschiedlichen Porenstruktur). Während sich für die F-Wände $a_{t,diff}$ und $a_{t,abs}$ nur geringfügig unterscheiden ($a_{t,diff} \approx a_{t,abs} \approx 19$), ist für die L-Wände $a_{t,diff} = 11,3$ ca. doppelt so groß wie $a_{t,abs} = 6,2$. Somit wird für gleich große Diffusionskoeffizienten der F- und L-Wände, der ISA_{10} -Wert der L-Wände ca. doppelt so groß sein wie derjenige der F-Wände (siehe Bild D165). Mit anderen Worten: Bei gleicher Diffusionsdichtigkeit ist die Absorptionsdichtigkeit der L-Wände wesentlich schlechter als diejenige der F-Wände.

Bild D166 zeigt die Ergebnisse der Versuchshäuser: Bei gleicher Absorptionsdichtigkeit ist die Diffusionsdichtigkeit der ungeschützt der Witterung ausgesetzten Oberflächen besser als jene der unter Dach befindlichen Oberflächen.

6. AUFSTELLUNG DES VORLÄUFIGEN DAUERHAFTIGKEITSMODELLS

Die Voraussetzungen des Modells, mit dem die Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit des am Bauwerk gemessenen ISA-Werts abgeschätzt werden kann, sind im Berichtsteil C zusammengestellt. Als wesentlich erwies sich die Annahme, daß das Transportverhalten von Beton durch die geometrischen Eigenschaften des Porensystems bestimmt ist. Diese konnte durch die Versuche bestätigt werden. Außerdem lassen sich an Hand der Versuchsergebnisse die übrigen Modellparameter quantifizieren. Letzteres erfolgt im Abschn. 6.1.2.

In Ergänzung der bisherigen Ableitungen, ergibt sich die Möglichkeit der Abschätzung der Karbonatisierungstiefe aus dem Diffusionsprodukt sowie dem Porenstrukturfaktor $a_{t,diff}$. Näheres dazu enthält der Abschnitt 6.1.1.

Mit der Anwendung des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells auf die hier untersuchten alten Betone beschäftigt sich Abschn. 6.2. Zusätzlich erfolgen dort Angaben zur erforderlichen Versuchsanzahl von ISA-Messungen und der dabei erzielbaren Signifikanz der Messergebnisse.

Im Abschn. 6.3 wird die Aussagesicherheit des Modells auf Grund des bisherigen Kenntnisstands abgeschätzt. Insbesondere die Regressionskoeffizienten c_1 und c_2 (siehe Abschn. 5.3.2) sind durch die bisherigen Auswertungen ungenügend abgesichert.

6.1 Vorläufige Bemessungsdiagramme der Betondauerhaftigkeit

6.1.1 Bemessungsdiagramm auf Grundlage der Porenkennwerte

Die bisherigen Ausführungen ergaben, daß der Diffusionskoeffizient durch die diffusionsrelevanten Kennwerte $r_{h,diff}$, ε_{diff} und $a_{t,diff}$ ausgedrückt werden kann. Setzt man diese anstelle des Diffusionskoeffizienten in das Karbonatisierungsgesetz von Schießl (siehe Abschn. 6 Berichtsteil C) ein, so kann die mittlere Endkarbonatisierungstiefe wie folgt gewonnen werden:

$$\bar{x}_{c\infty} = \frac{K(r_{h,diff}) \cdot \varepsilon_{diff} \cdot \Delta c}{a_{t,diff} \cdot \bar{b}} \quad (D14)$$

Hierin sind $a_{t,diff}$ und \bar{b} je nach den äußeren Bedingungen einzusetzen. Da bei dieser Substitution der Einfluß der Feuchte auf die Größe des Diffusionskoeffizienten unberücksichtigt bleibt, ist die mit Gl.(D14) geschätzte Endkarbonatisierungstiefe in der Regel zu groß.

Bild D167 zeigt die Auswertung von Gl.(D14), wobei mit

$$\Delta c = 0,00054 \text{ kg/m}^3$$

und

$$\bar{b} = 4,32 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h)}$$

gerechnet wurde. Der Einfluß der Porenstruktur auf die zu erwartende Endkarbonatisierung wird deutlich. Es reicht nicht aus, nur die Porenradien-

verteilung zu kennen. Da eine direkte Bestimmung des Porenstrukturfaktors z.Z. nicht möglich ist, und wie oben gesagt, der Einfluß der Feuchte auf die Dichtigkeit des Betons nicht berücksichtigt ist, ist die baupraktische Anwendung von Gl.(D14) nur eingeschränkt möglich.

6.1.2 Bemessungsdiagramme auf Grundlage von ISA-Messungen

Im Abschnitt 5.3.2 wurde nachgewiesen, daß der CO_2 -Diffusionskoeffizient und der ISA_{10} -Wert linear zusammenhängen. Dieser Zusammenhang konnte für an getrockneten Proben gemessene Diffusionskoeffizienten und für auf feuchten Wandoberflächen gemessene ISA_{10} -Werte quantifiziert werden (siehe Tab. 07). Auf Grundlage dieses Zusammenhangs ergibt sich:

$$\bar{x}_{c\infty} = \frac{(c_1 + c_2 \cdot \overline{\text{ISA}}_{10}) \cdot \Delta c}{\bar{b}} \quad (\text{D15})$$

$$x_{c\infty,95} = 1,7 \cdot \bar{x}_{c\infty} \quad (\text{D16})$$

Bild D168 zeigt den Zusammenhang zwischen der Endkarbonatisierungstiefe und dem mittleren $\overline{\text{ISA}}_{10}$ -Wert nach Gl.(D15).

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Karbonatisierungstiefe ergibt sich für Innenräume nach dem \sqrt{t} -Gesetz zu:

$$\bar{x}_c(t) = \sqrt{\frac{2 (c_1 + c_2 \cdot \overline{\text{ISA}}_{10}) \cdot \Delta c}{a}} \sqrt{t}, \quad (\text{D17})$$

und für im Freien lagernde Bauteile nach [D6] zu

$$t = - \frac{a}{b} \left(\bar{x}_c + \bar{x}_{c\infty} \cdot \ln \left(1 - \frac{\bar{x}_c}{\bar{x}_{c\infty}} \right) \right) \quad (\text{D18})$$

Bei Kenntnis der Dicke der Betondeckung und deren Streuung kann aus der Bedingung

$$\bar{c} \geq \bar{x}_c(t) \quad \text{bzw.} \quad c_{\min} \geq x_{c95}(t), \quad (\text{D19})$$

der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem Extremwerte der Karbonatisierungstiefe und der Dicke der Betondeckung gleich sind. Dieser Zeitpunkt entspricht der Dauerhaftigkeit (s. Bilder D169 und D170).

Diese Zusammenhänge sind wenig gesichert. Die Beziehung zwischen D_{CO_2} und ISA_{10} berücksichtigt nur zum Teil den Feuchteeinfluß. Die Karbonatisierungshemmungskonstante \bar{b} ist bislang durch Versuche nicht abgesichert; es existieren nur empirische Angaben.

6.2 Anwendung des Dauerhaftigkeitsmodells auf die Versuchshäuser in Beckum

Mit den im Alter von ca. 25 Jahren gemessenen \overline{ISA}_{10} -Werten kann man $\bar{x}_C(t)$ mit den Gl.(D17) und (D18) sowie den Angaben von Tab. D7 vorhersagen und mit den gemessenen Karbonatisierungstiefen vergleichen.

Da diese Häuser größtenteils unbewehrt sind, erfolgt zur Prognose der Dauerhaftigkeit ein Vergleich der erwarteten Karbonatisierungstiefe mit der minimalen Dicke der Betondeckung nach DIN 1045.

Bild D171 stellt die Ergebnisse der Westwand, Bild D172 die der Ostwand von Haus 1 dar. Für die Westwand ergibt sich eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Messung und Vorhersage. Bis zum Alter von 24,5 Jahren stimmen für die Innen- und -außenseite die errechneten mittleren Karbonatisierungstiefen mit den gemessenen Werten überein. Dabei erreichen auch Karbonatisierungsspitzen nicht die Tiefe die der Mindestdicke der Betondeckung nach DIN 1045 entsprechen würde. Somit besitzt die Westwand eine, für die hier definierte Beanspruchung unbegrenzte Dauerhaftigkeit.

Für die Ostwand sind keine eindeutigen Ergebnisse und Schlußfolgerungen möglich. Die ISA_{10} -Werte und Karbonatisierungstiefen wurden jeweils nur an zwei verschiedenen Bohrkernen gemessen. Sowohl die dabei festgestellten ISA_{10} -Werte 0,02 und 0,08 $\text{ml/m}^2 \cdot \text{s}$ sowie die Karbonatisierungstiefen 2,0 und 13,8 mm (Lagerung ungeschützt im Freien) differieren zu stark, um für die daraus ermittelten Mittelwerte eine Vorhersage der Dauerhaftigkeit durchführen zu können. Die im Alter von 24,5 Jahren gemessene Karbonatisierungstiefe ist deutlich größer als der vorhergesagte Wert.

Der aufgrund der im Berichtsteil B festgestellten Materialstreuung erforderliche Versuchsumfang liegt je nach Anforderung an die Signifikanz mit der der ISA_{10} -Wert festgelegt werden soll, wesentlich höher als bei $n = 2$.

Für die folgenden Annahmen kann er abgeschätzt werden:

- a) Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,20$; zweiseitig
- b) Aussagesicherheit $\beta = 0,05$; zweiseitig
- c) der Mittelwert der ISA_{10} -Werte soll auf $\delta = \Delta ISA_{10} = 0,25$ ($w/z = 0,4$) signifikant bestimmt werden
- d) einer (siehe Bilder B48 und B49) w/z -Wert abhängigen Standardabweichung s von näherungsweise
 $s \approx 0,17$ ($w/z = 0,4$),
wobei gilt: $0,5 \leq w/z \leq 1,0$
(Mittelung zwischen den Nachbehandlungsverhältnissen).

Der Versuchsumfang ergibt sich nach

$$n \geq \frac{2 \cdot s^2 (t_{\alpha, n-1} + t_{2\beta, n-1})^2}{\delta^2} \quad (D20)$$

mit

t : Wert der Student t -Verteilung für die angegebenen Parameter

δ : Größe der Abweichung, für den der mittlere ISA_{10} -Wert als signifikant nachgewiesen werden soll

zu $n = 10$ Versuche.

Diese Angabe gilt natürlich nicht für eine beliebig große Betonoberfläche. Eine sinnvolle Begrenzung auf Bauabschnitte gleicher Betonzusammensetzung ist erforderlich.

6.3 Zur Aussagesicherheit des Dauerhaftigkeitsmodells

Das vorläufige Dauerhaftigkeitsmodell ist weitgehend deterministisch. Zudem mußten Vereinfachungen vorgenommen und Annahmen getroffen werden. Diese betreffen:

- Der D_{CO_2} -Wert wurde nur an getrockneten Proben bestimmt. Dies ist aber nicht der für die Karbonatisierung im Freien maßgebende Wert.
- Das angewandte Karbonatisierungsgesetz erfaßt die Wechselwirkung zwischen Karbonatisierung und Witterung nur unzureichend.
- Die Streuung der Karbonatisierungstiefe und Dicke der Betondeckung wurde angenommen.
- Die Basis der Ableitungen bleibt das Idealporenmodell. Die dabei festgestellte Proportionalität zwischen Transportprodukt und -koeffizient konnte nur nachgewiesen werden, sofern es sich um getrocknete Proben handelte, bzw. wenn die ISA-Messungen frühestens 48 Stunden nach dem letzten Regen erfolgten.
- Der Übergang auf reale Betonporen erfolgte durch rechnerische Bestimmung von $a_{t,abs}$ und $a_{t,diff}$ als Korrekturgrößen des Idealporenmodells.
- Es wurde eine Beziehung zwischen D_{CO_2} und ISA_{10} abgeleitet, die nicht berücksichtigt, daß der Diffusionskoeffizient an getrockneten Proben bestimmt wurde und die ISA-Messungen aber auf feuchten Betonoberflächen stattfanden.
- Die Annahme einer linearen Abhängigkeit zwischen $a_{t,abs}$ und $a_{t,diff}$ ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0,51. Die Versuchsergebnisse bestätigen somit diese Annahme nicht (siehe Bild D160).

Somit erfordern insbesondere die letzten beiden Punkte eine Überprüfung der Aussagekraft von Gl.(D13) die zur Vorhersage der Karbonatisierungstiefe nach Gl.(D15) dient. Nach Gl.(D15) hängt die Endkarbonatisierungstiefe von den Größen c_1 , c_2 , ISA_{10} , \bar{b} und Δc ab. Nur Δc kann als konstant angenommen werden. Damit ergibt sich die Varianz der Endkarbonatisierungstiefe aus der Varianz der Einzelgrößen, die aber nicht bekannt sind. Es lassen sich aber

aus den Versuchsergebnissen Streubänder für c_1 und c_2 , aus [D6] ein solches für \bar{b} und mit Abschn. 6.2 ein solches für \overline{ISA}_{10} , schätzen (siehe Tab. D8). Diese Streubänder beruhen auf folgenden Annahmen:

- Für c_1 und c_2 wird zum einen davon ausgegangen, daß die in Tab. D7 angegebenen Werte für c_1 und c_2 i.M. richtig sind. Unter der Annahme, daß sie normalverteilt sind und durch Berücksichtigung eines Schätzwerts ihres Variationskoeffizienten von 40 %, ergeben sich die Angaben der Fälle 1 - 4.

Zum anderen wird auf Grundlage von Bild D160 in Bild D173 der gesamte Wertebereich der Meßwerte von $a_{t,abs}$ und $a_{t,diff}$ zugrundegelegt (siehe schraffierte Fläche in Bild D173). Mit den dort eingezeichneten Grenzwerten für b_1 und b_2 , und unter der Voraussetzung, daß für die übrigen Größen, die in die Berechnung von c_1 und c_2 eingehen, die Werte von Tab. D7 übernommen werden können, ergeben sich die Angaben zu den Fällen 5 - 8.

- Für die Lagerung ungeschützt im Freien ergibt sich nach [D6] der Wertebereich für \bar{b} zu:

$$2,5 \cdot 10^{-6} < \bar{b} < 6,5 \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}].$$

- Die folgenden Untersuchungen werden exemplarisch für $\overline{ISA}_{10} = 0,07$ und für $\overline{ISA}_{10} = 0,15 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ durchgeführt. Um gleichzeitig abschätzen zu können, wie sich die Varianz der ISA-Messungen auf die Varianz der Karbonatisierungstiefe auswirkt, wurden pro untersuchten mittleren ISA-Wert, zwei verschieden große Streubänder untersucht:

Für $\overline{ISA}_{10} = 0,07 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$$0,02 < \overline{ISA}_{10} < 0,12 \text{ und}$$

$$0,03 < \overline{ISA}_{10} < 0,11.$$

Für $\overline{ISA}_{10} = 0,15 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$$0,07 < \overline{ISA}_{10} < 0,23 \text{ und}$$

$$0,09 < \overline{ISA}_{10} < 0,21.$$

Untersucht werden soll nun, welche Varianz sich für $\bar{x}_{c\infty}$ nach Gl.(D15) bei Berücksichtigung obiger Wertebereiche für die einzelnen Größen ergibt, und ob diese mit jener der gemessenen Karbonatisierungstiefe vergleichbar ist (siehe dazu Abschn. 6.4.1, Berichtsteil C). Dazu wird eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Mit Hilfe von Zufallszahlen wird für die 4 Größen c_1 , c_2 , \bar{b} und ISA_{10} ein zufälliger Wert aus dem jeweiligen Wertebereich ausgewählt, und mit Gl.(D15) die zugehörige Endkarbonatisierungstiefe berechnet. Da es sich nur um eine Abschätzung handelt, werden gleichverteilte Zufallszahlen verwendet, obwohl insbesondere für den ISA_{10} -Wert und für die erste Annahme bezüglich c_1 und c_2 , von einer Normalverteilung auszugehen ist. Eine solche Rechnung wird pro untersuchten Fall 500mal ausgeführt. Dies erwies sich als ausreichend, da sich keine signifikanten Unterschiede gegenüber 5000 Simulationsläufen ergaben. Die sich aus dieser Rechnung ergebenden Endkarbonatisierungstiefen werden anschließend statistisch ausgewertet. Das sich daraus ergebende Verhältnis \bar{x}_c zu $x_{c\infty}$ kann mit dem aus Meßergebnissen abgeleiteten Wert von 1,7 nach Gl.(D16) verglichen werden.

Die zugehörigen Ergebnisse der Simulationsrechnung sind Tab. D9 und Bild D174 zu entnehmen. Ohne auf alle Einzelheiten einzugehen ergeben sich daraus folgende Schlußfolgerungen:

- 1.) I.M. aller Fälle, ergibt sich für das Verhältnis $x_{c\infty,95}$ zu $\bar{x}_{c\infty}$ ein Faktor von 1,75. Dieser ist nur geringfügig größer als 1,7.
- 2.) Eine Verringerung des Variationskoeffizienten der ISA-Messungen um ca. 8% bewirkt eine Verringerung von $x_{c\infty,95}$ um 0,4 - 1,1 mm. Da nur die Streubreite der ISA_{10} -Werte variiert wurde, nicht jedoch der jeweilige Mittelwert des Streubands, bleibt die mittlere Karbonatisierungstiefe jeweils gleich groß.
- 3.) Wie Bild D174 zeigt ist eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den Vorhersagewerten nach Gl.(D15) und (D16) und denen der Simulationsrechnung gegeben. Dies läßt zwar die Modellanwendung auf durch die Versuchsparameter nicht abgedeckte Bauteile nicht zu, bestätigt aber, daß grundsätzlich die Modellanwendung mit keiner unzulässig großen Unsicherheit verbunden ist.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [D1] Smolczyk, H.G.; Romberg, H.: Der Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton. Tonindustriezeitung 100 (1976), H. 10, S. 349/357 und H. 11, S. 381/390.
- [D2] Litvan, G.G.; Meyer, A.: Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, 21.-25. April 1986.
- [D3] Gräf, H.: Über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluß auf Gebrauchseigenschaften von Beton. Dissertation, Essen, 1988.
- [D4] Schönlin, K.: Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation, Karlsruhe, 1989.
- [D5] Nischer, P.: Auswirkungen frühzeitiger Überlastung und mangelnder Nachbehandlung auf die Eigenschaften des Betons nach vollständiger Erhärtung. Betonwerk und Fertigteiltechnik, H. 7, S. 443/448, 1983.
- [D6] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Heft 255 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.

TABELLEN

TEIL D

Tab. D1: Zusammenstellung der Einflüsse betontechnologischer Parameter auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons.

Art der Beeinflussung	Parameter	Einfluß des Parameters auf die angegebenen Porenanteile		
		Gelporosität ϵ_{gel}	Kapillarporosität ϵ_{cap} (ohne Verbundporen)	Verbundporosität bzw. kap. wirksame Porosität ϵ_{abs}
Phys.-chem. Einflüsse	Hydratation	Mit zunehmenden Hydrationsgrad m nimmt ϵ_{gel} zu.	Mit zunehmenden Hydrationsgrad m nimmt ϵ_{cap} ab.	---
	Karbonatisierung	---	---	Infolge Karbonatisierung nimmt ϵ_{abs} ab.
Einflüsse Betonzusammensetzung	w/z-Wert	---	Mit steigenden w/z-Wert nimmt ϵ_{cap} zu.	Mit steigenden w/z-Wert nimmt ϵ_{abs} zu.
	Sieblinie	---	Da mit abnehmenden Größtkorn der Beton zementsteinähnlicher wird, nimmt ϵ_{cap} zu.	Da mit abnehmenden Größtkorn das Gefüge homogener wird, nimmt ϵ_{abs} in den großen Poren ab.
	Zementart	Mit steigenden Hütten-sandgehalt nimmt ϵ_{gel} zu.	Mit steigenden Hütten-sandgehalt nimmt ϵ_{cap} (deutlich) ab.	---
Betontechnologische Herstellungsbedingungen	Betonierdatum	Je nach den Witterungsverhältnissen im Anschluß an die Betonage wird die Hydratation beschleunigt oder verlangsamt; Hydratationseinfluß siehe oben.		
	Wandtiefe	Mit zunehmenden Abstand von der Wandoberfläche verbessern sich die Hydratations- (siehe oben) und sonstigen Erhärtungsbedingungen (insgesamt geringere Porosität).		
	Nachbehandlung	Je intensiver die Nachbehandlung, desto günstiger verläuft die Hydratation; Hydratationseinfluß siehe oben.		
Witterung	Lage-rungsbedingungen	siehe Betonierdatum		

Tab. D2: Zusammenstellung der Auswirkungen die die einzelnen Parametervariationen auf die Größe und Veränderung der Fraktiltradien haben.

Einfluss des angegebenen Parameters auf die Größe der Fraktiltradien								
Hydratationsgrad m	Karbonatisierung	w/z-Wert	Sieblinie	Zementart	Betonierdatum	Wandtiefe	Nachbehandlung	Lagerungsbedingungen
$r_{0,10}(m_1) > r_{0,10}(m_2)$ $r_{0,25}(m_1) > r_{0,25}(m_2)$ $r_{0,50}(m_1) > r_{0,50}(m_2)$ $r_{0,75}(m_1) < r_{0,75}(m_2)$ $r_g(m_1) ? r_g(m_2)$	$r_{0,10}(x_{c2}) < r_{0,10}(x_{c1})$ $r_{0,25}(x_{c2}) < r_{0,25}(x_{c1})$ $r_{0,50}(x_{c2}) < r_{0,50}(x_{c1})$ $r_{0,75}(x_{c2}) < r_{0,75}(x_{c1})$ $r_g(x_{c2}) < r_g(x_{c1})$	$r_{0,10}(w/z_2) < r_{0,10}(w/z_1)$ $r_{0,25}(w/z_2) < r_{0,25}(w/z_1)$ $r_{0,50}(w/z_2) < r_{0,50}(w/z_1)$ $r_{0,75}(w/z_2) < r_{0,75}(w/z_1)$ $r_g(w/z_2) < r_g(w/z_1)$	$r_{0,10}(\phi_2) < r_{0,10}(\phi_1)$ $r_{0,25}(\phi_2) < r_{0,25}(\phi_1)$ $r_{0,50}(\phi_2) < r_{0,50}(\phi_1)$ $r_{0,75}(\phi_2) < r_{0,75}(\phi_1)$ $r_g(\phi_2) < r_g(\phi_1)$	$r_{0,10}(PZ) > r_{0,10}(HOZ)$ $r_{0,25}(PZ) > r_{0,25}(HOZ)$ $r_{0,50}(PZ) > r_{0,50}(HOZ)$ $r_{0,75}(PZ) < r_{0,75}(HOZ)$ $r_g(PZ) ? r_g(HOZ)$	$r_{0,10}(a) < r_{0,10}(b)$ $r_{0,25}(a) < r_{0,25}(b)$ $r_{0,50}(a) < r_{0,50}(b)$ $r_{0,75}(a) > r_{0,75}(b)$ $r_g(a) ? r_g(b)$	$r_{0,10}(1) < r_{0,10}(2)$ $r_{0,25}(1) < r_{0,25}(2)$ $r_{0,50}(1) < r_{0,50}(2)$ $r_{0,75}(1) < r_{0,75}(2)$ $r_g(1) < r_g(2)$	$r_{0,10}(NB2) < r_{0,10}(NB1)$ $r_{0,25}(NB2) < r_{0,25}(NB1)$ $r_{0,50}(NB2) < r_{0,50}(NB1)$ $r_{0,75}(NB2) > r_{0,75}(NB1)$ $r_g(NB2) ? r_g(NB1)$	$r_{0,10}(F) < r_{0,10}(L)$ $r_{0,25}(F) < r_{0,25}(L)$ $r_{0,50}(F) < r_{0,50}(L)$ $r_{0,75}(F) > r_{0,75}(L)$ $r_g(F) ? r_g(L)$
Anmerkung: $m_2 > m_1$ bzw. da mit zunehmenden Betonalter m zunimmt, gilt dies auch für $t_2 > t_1$ (ohne Karbonatisierung) (siehe Bild D4)	Anmerkung: $x_{c2}(t_2) > x_{c1}(t_1)$ bzw.: 2: karbonatisiert 1: nicht karbonatisiert (siehe Bild D5)	Anmerkung: $w/z_2 < w/z_1$ (siehe Bild D6)	Anmerkung: $\phi_2 < \phi_1$ d.h.: 2: Mörtel 1: Beton (siehe Bild D7)	Anmerkung: (siehe Bild D4)	Anmerkung: a: günstige Bedingungen b: ungünstige Hydratationsbedingungen (siehe Bild D4)	Anmerkung: 1: innen 2: außen (siehe Bild D8)	Anmerkung: Nachbehandlung NB2 intensiver als Nachbehandlung NB1 (siehe Bild D4)	Anmerkung: F: ungeschützt im Freien L: Labor (nur Hydratations-einflüsse) (siehe Bild D4)

Tab. D3: Zusammenstellung der Fraktiltradien $r_{0,10}$, r_g und $r_{0,50}$ für die Wandtiefe 0-10 mm der Wände A - D getrennt nach den beiden unterschiedlichen Nachbehandlungsarten.

Wand	$r_{0,10}$ [nm]		r_g [nm]			$r_{0,50}$ [nm]			Mittelwert der Radienverhältnisse für r_g und $r_{0,50}$ zusammen pro Wandpaar	
	nachbehandelt	nicht nachbehandelt	nachbehandelt	nicht nachbehandelt	$\frac{r_{g,0,NB}}{r_{g,NB}}$	nachbehandelt	nicht nachbehandelt	$\frac{r_{0,50,0,NB}}{r_{0,50,NB}}$		
AF	7,85	8,10	39,0	48,5	1,24	36,25	47,5	1,31	1,28	1,25
AL	7,15	7,70	35,4	41,5	1,17	33,75	42,7	1,27	1,22	
BF	6,80	7,95	79,5	84,0	1,06	78,8	98,1	1,24	1,15	1,36
BL	6,70	8,20	51,0	75,2	1,48	50,2	84,4	1,68	1,58	
C	6,00	7,70	38,2	56,9	1,49	40,6	61,6	1,52	1,51	1,51
D	6,90	8,15	44,4	59,8	1,35	44,4	75,1	1,69	1,52	
Mittelwert	6,90	8,00			1,30			1,45		

Tab. D4: Zusammenstellung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung in Abhängigkeit der versuchsvorbereitenden Trocknungsart (nur Proben aus dem mittleren Bohrkernbereich).

Wand [-]	Kern- Nr. [-]	Vakuumtrocknung				Trockenschranktrocknung			
		ϵ_{abs} [cm ³ /kg]	$r_{h,abs}$ [nm]	ϵ_{diff} [cm ³ /kg]	$r_{h,diff}$ [nm]	ϵ_{abs} [cm ³ /kg]	$r_{h,abs}$ [nm]	ϵ_{diff} [cm ³ /kg]	$r_{h,diff}$ [nm]
AF	99	13,2	188,0	17,4	73,4	14,1	110,2	35,3	36,0
		13,3	173,1	17,3	75,1	17,9	120,6	40,6	38,5
						14,8	121,9	35,3	37,4
BF	79	14,7	145,9	25,1	49,0	20,3	116,6	38,6	39,5
		10,6	146,9	18,2	48,5	25,3	101,6	56,4	34,6
		13,8	160,0	24,2	48,9	24,3	105,7	52,1	35,2
BL	27	15,5	144,9	24,4	51,7	26,0	129,4	47,4	44,3
		17,8	154,8	26,6	56,2	26,4	123,9	50,8	42,6
C	28	22,0	96,7	47,6	39,1	37,7	110,7	72,4	44,1
		22,4	118,5	46,8	40,9	33,4	119,1	64,1	45,1
		25,1	111,5	49,9	42,2				
C	76	13,7	106,7	29,1	35,6	29,5	97,0	65,3	36,7
		14,1	100,2	29,0	36,6	34,0	101,9	69,1	39,8
D	66	12,4	84,0	37,5	31,4	36,0	107,8	68,6	41,2
		15,2	99,5	36,9	34,8	37,3	104,5	71,0	41,3
		26,7	112,8	48,3	44,7	37,0	113,9	67,5	43,1
Mittelwert		16,7	129,6	31,9	47,2	27,6	112,3	55,6	40,0

Tab. D5: Zusammenstellung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung für die Objekte Institutswand und Kühlhauswand.

Objekt [-]	Transportrelevante Kennwerte der Porenradienverteilung			
	ϵ_{abs} [cm ³ /kg]	$r_{h,abs}$ [nm]	ϵ_{diff} [cm ³ /kg]	$r_{h,diff}$ [nm]
Instituts- wand: 0-10 mm	17,9	139	39,0	40,6
	22,5	147	45,5	42,9
Mitte	13,9	183	17,6	84
	13,9	238	16,3	105
Kühlhaus- wand: Mitte	41,2	192	51,2	85
	35,0	176	45,4	75

Tab. D6: Ausgangswerte der multiplen Regression des ISA_{10} -Wertes für die Parameter Betonalter, w/z-Wert und Lagerungsbedingungen.

Betonalter [Tage]	Parameter w/z-Wert [-]	Lagerungs- bedingung [-]	ISA_{10} -Wert [ml/m ² s]	Bemerkung
494	0,7	F	0,238	Wand BF, ohne Nachbehandlung
494	0,7	F	0,253	Wand BF, mit Nachbehandlung
1058	0,7	F	0,107	Wand BF, mit Nachbehandlung
1290	0,7	F	0,120	Wand BF, mit Nachbehandlung
1386	0,7	F	0,090	Wand BF, mit Nachbehandlung
508	0,7	L	0,424	Wand BL, ohne Nachbehandlung
1058	0,7	L	0,420	Wand BL, ohne Nachbehandlung
1400	0,7	L	0,408	Wand BL, ohne Nachbehandlung
508	0,7	L	0,327	Wand BL, mit Nachbehandlung
1400	0,7	L	0,390	Wand BL, mit Nachbehandlung
400	0,5	F	0,035	Wand AF, ohne Nachbehandlung
480	0,5	F	0,030	Wand AF, mit Nachbehandlung
975	0,5	F	0,030	Wand AF, mit Nachbehandlung
1300	0,5	F	0,033	Wand AF, mit Nachbehandlung
472	0,5	L	0,253	Wand AL, ohne Nachbehandlung
1300	0,5	L	0,257	Wand AL, ohne Nachbehandlung

Tab. D7: Zusammenstellung der Ausgangsdaten für die Korrelation des CO_2 -Diffusionskoeffizienten und des ISA_{10} -Wertes nach Gl. (D13).

Konstante	Wände A - D		Versuchshäuser in Beckum	
	F-Wände	L-Wände	Äußere Oberfläche	Innere Oberfläche
a_1	0,000274	0,000274	0,000131	0,000131
a_2	0,0166	0,0166	0,01501	0,01501
b_1	11,82	11,82	14,66	1,67
b_2	0,31	0,31	0,554	0,406
$a_{t,abs}$	18,90	6,20	≈11,50 (geschätzt)	≈8,00 (geschätzt)
k_3	27,5644	27,5644	27,5644	27,5644
c_1	$0,155 \cdot 10^{-4}$	$0,199 \cdot 10^{-4}$	$0,0623 \cdot 10^{-4}$	$0,266 \cdot 10^{-4}$
c_2	$6,439 \cdot 10^{-4}$	$2,717 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$8,85 \cdot 10^{-4}$

Tab. D8: Streubänder der Parameter c_1 , c_2 , b und ISA_{10} .

Parameter	Nr. des zu untersuchenden Falls							
	1	2	3	4	5	6	7	8
c_1	$0,06 \cdot 10^{-4} - 0,25 \cdot 10^{-4}$				$0,11 \cdot 10^{-4} - 0,25 \cdot 10^{-4}$			
c_2	$2,6 \cdot 10^{-4} - 10,3 \cdot 10^{-4}$				$4,7 \cdot 10^{-4} - 10,5 \cdot 10^{-4}$			
b [kg/m ² h]	$2,5 \cdot 10^{-6} - 6,5 \cdot 10^{-6}$							
ISA_{10} [ml/m ² s]	0,02-0,12	0,03-0,11	0,07-0,23	0,09-0,21	0,02-0,12	0,03-0,11	0,07-0,23	0,09-0,21

Tab. D9: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Überprüfung der Aussagekraft von Gl.(D15).

Parameter	Nr. des untersuchten Falls							
	1	2	3	4	5	6	7	8
KARBONATISIERUNG								
$x_{c\infty}$ [mm]	7,8	7,8	14,5	14,5	9,2	9,2	17,0	17,0
s_{xc} [mm]	3,98	3,69	7,22	6,73	4,20	3,82	7,41	6,76
v_{xc} [%]	51,0	47,3	49,8	46,4	45,7	42,0	43,6	39,8
$x_{c\infty,95}$ [mm] ¹⁾	14,3	13,9	26,3	25,5	16,1	15,4	29,2	28,1
$x_{c\infty,95}/x_{c\infty}$ [-]	1,83	1,78	1,81	1,76	1,75	1,69	1,72	1,65
ISA-WERTE								
ISA_{10} [ml/m ² s]	0,071	0,071	0,152	0,151	0,071	0,071	0,151	0,151
s_{ISA10} [ml/m ² s]	0,028	0,023	0,045	0,034	0,028	0,023	0,045	0,034
v_{ISA10} [%]	39,9	32,0	29,9	22,5	39,9	32,0	30,1	22,5

Anmerkungen: 1) $x_{c\infty,95} = x_{c\infty} + 1,64 s_{xc}$

ABBILDUNGEN

TEIL D

Parameter	WÄNDE A - D , PZ 35 F									
Lagerungs- bedingungen	F-Lagerung : AF, BF, C, D					L-Lagerung : AL, BL (60°C, 65% rel. F)				
Nachbehand.	nachbehandelt		n. nachbehandelt			nachbehandelt		n. nachbehandelt		
Beton- zusammen- setzung	BETON	MÖRTEL	BETON	MÖRTEL		BETON				
	0.5	0.7	WIZ=0.7	0.5	0.7	0.7	0.5	0.7	0.5	0.7
Tiefe in mm	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10
	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20
	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Alter in Tage	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	28	28	28	28	28	28	120	90	120	90
	120	90	90	120	90	90	400	400	400	400
	400	400	400	400	400	400	960	1010	960	1010
	960	780	700	960	780	700				
		1010			1010					

Bild D1: Übersicht der Parametervariation der Wände A - D.

Parameter	BECKUM HS1-HS4, natürliche Witterung							
Lagerungs- bedingungen	im Freien ungeschützt				im Freien unter Dach			
Nachbehand.	5 Tage Schalung				5 Tage Schalung			
Beton- zusammen- setzung	BETON				BETON			
	PZ 275	HOZ 275	HOZ 375		PZ 275	HOZ 275	HOZ 375	
	w/z=0.6(HS1)	w/z=0.45(HS2)	w/z=0.58(HS4)	w/z=0.54(HS3)	w/z=0.6(HS1)	w/z=0.45(HS2)	w/z=0.58(HS4)	w/z=0.54(HS3)
Alter	t=24.5 Jahre	t=24.5 Jahre	t=23.5 Jahre	t=24.5 Jahre	t=24.5 Jahre	t=24.5 Jahre	t=23.5 Jahre	t=24.5 Jahre
Tiefe in mm	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10
	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20
	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50
	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte

Bild D2: Übersicht der Parametervariation der Versuchshäuser in Beckum.

Parameter	ZEITGERAFFTE BEWITTERUNGSVERSUCHE														
Nachbehand.	nachbehandelt														
Beton- zusammen- setzung	BETON										MÖRTEL				
	w/z = 0.5					w/z = 0.7					w/z = 0.7				
Tiefe in mm	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Anzahl der Zyklen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000

Bild D3: Übersicht der Parametervariation der künstlich bewitterten Kleinkörper zugehörig zu den Wänden A - D.

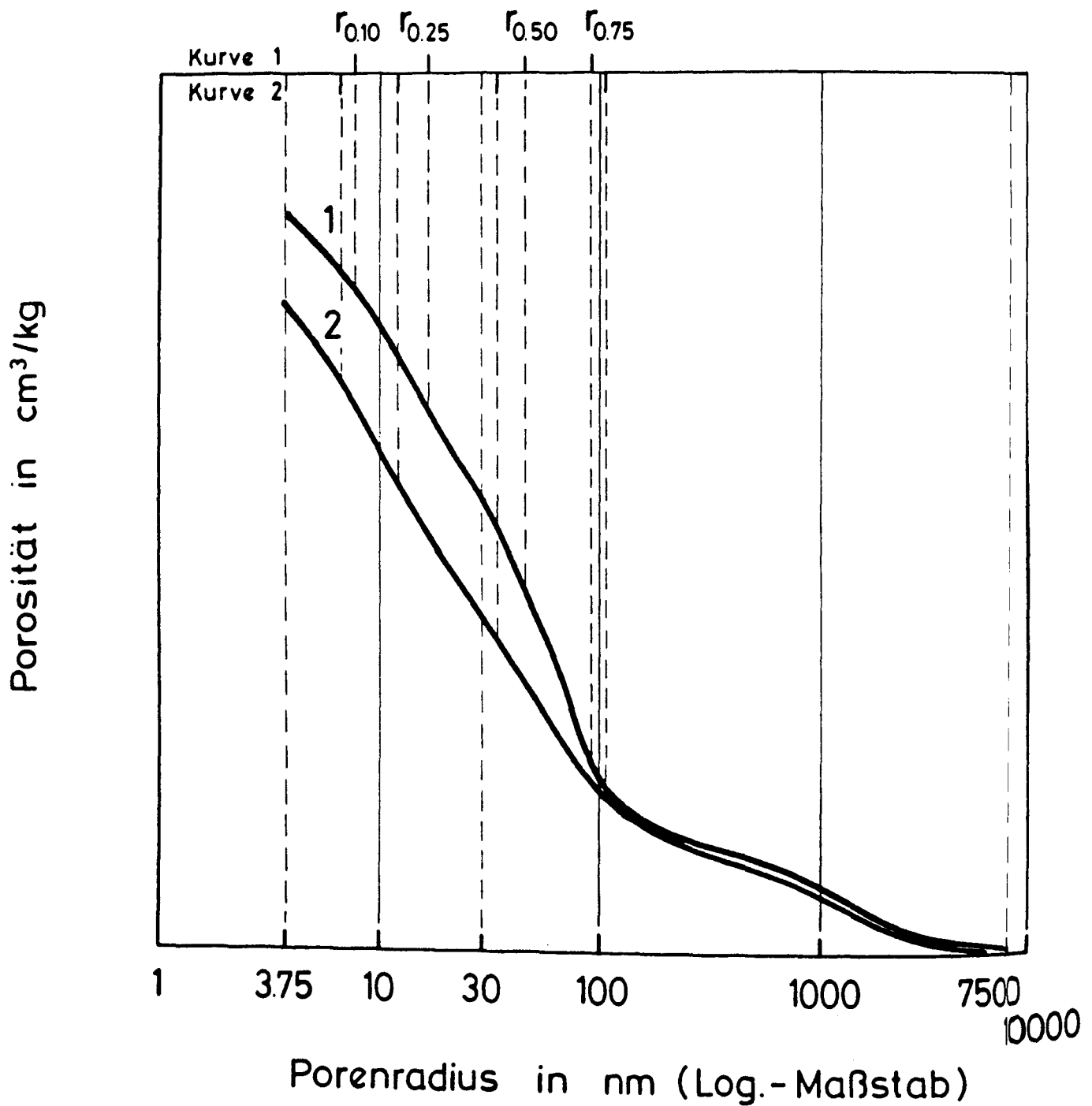


Bild D4: Einfluß des Hydratationsgrades (Lagerungsbedingungen, Nachbehandlung) auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons und die sich daraus ableitenden Konsequenzen bezüglich der Veränderung der Fraktalradien ($m(\text{Kurve 1}) < m(\text{Kurve 2})$).

Anm.: Für den Wechsel der Zementart PZ (Kurve 1) zu HÖZ (Kurve 2) ergeben sich analoge Einflüsse auf die Fraktalradien.

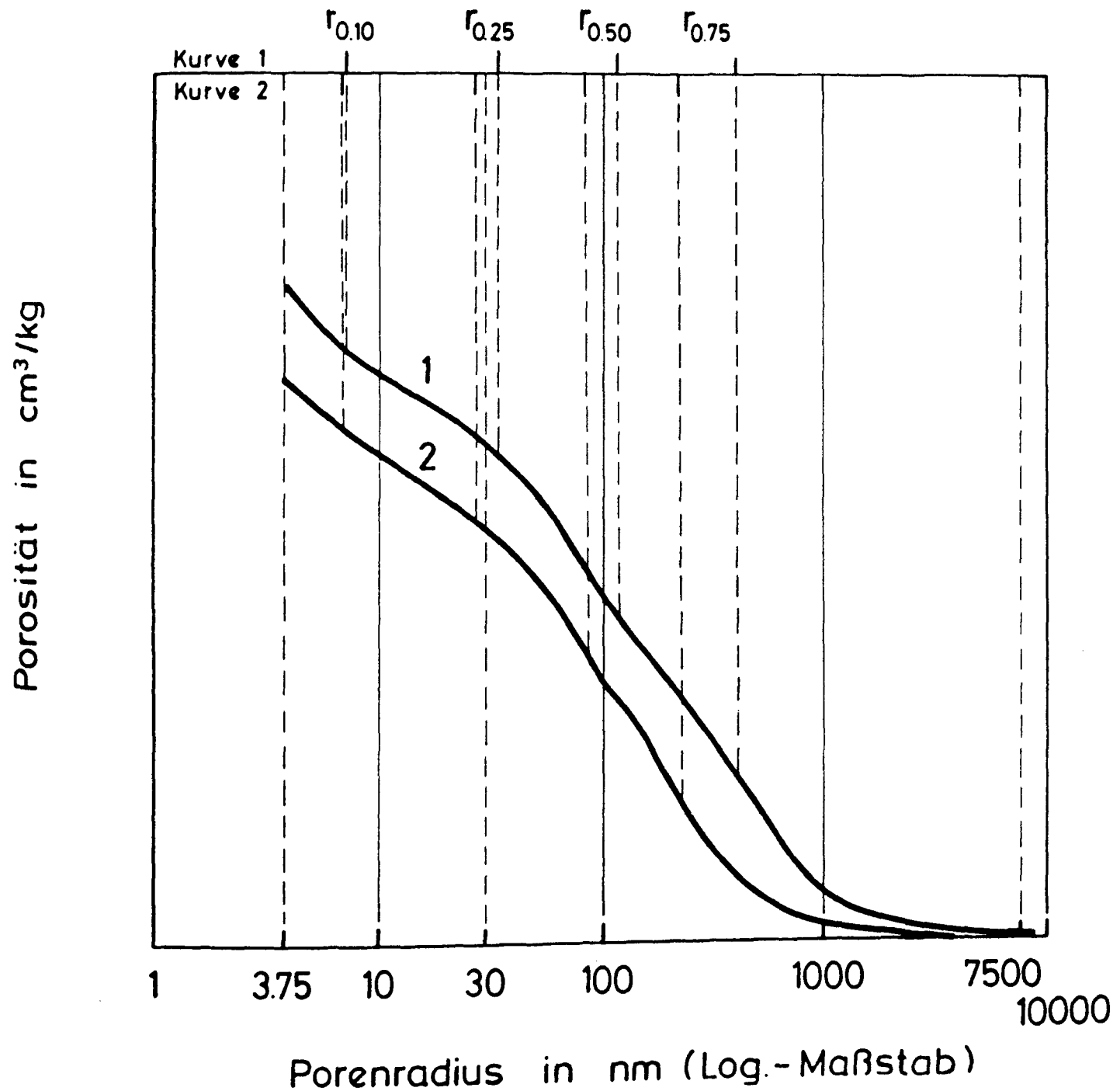


Bild D5: Einfluß der Karbonatisierung auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons und die sich daraus ableitenden Konsequenzen bezüglich der Veränderung der Fraktalradien (Kurve 2 repräsentiert den Beton mit der größeren Karbonatisierungstiefe).

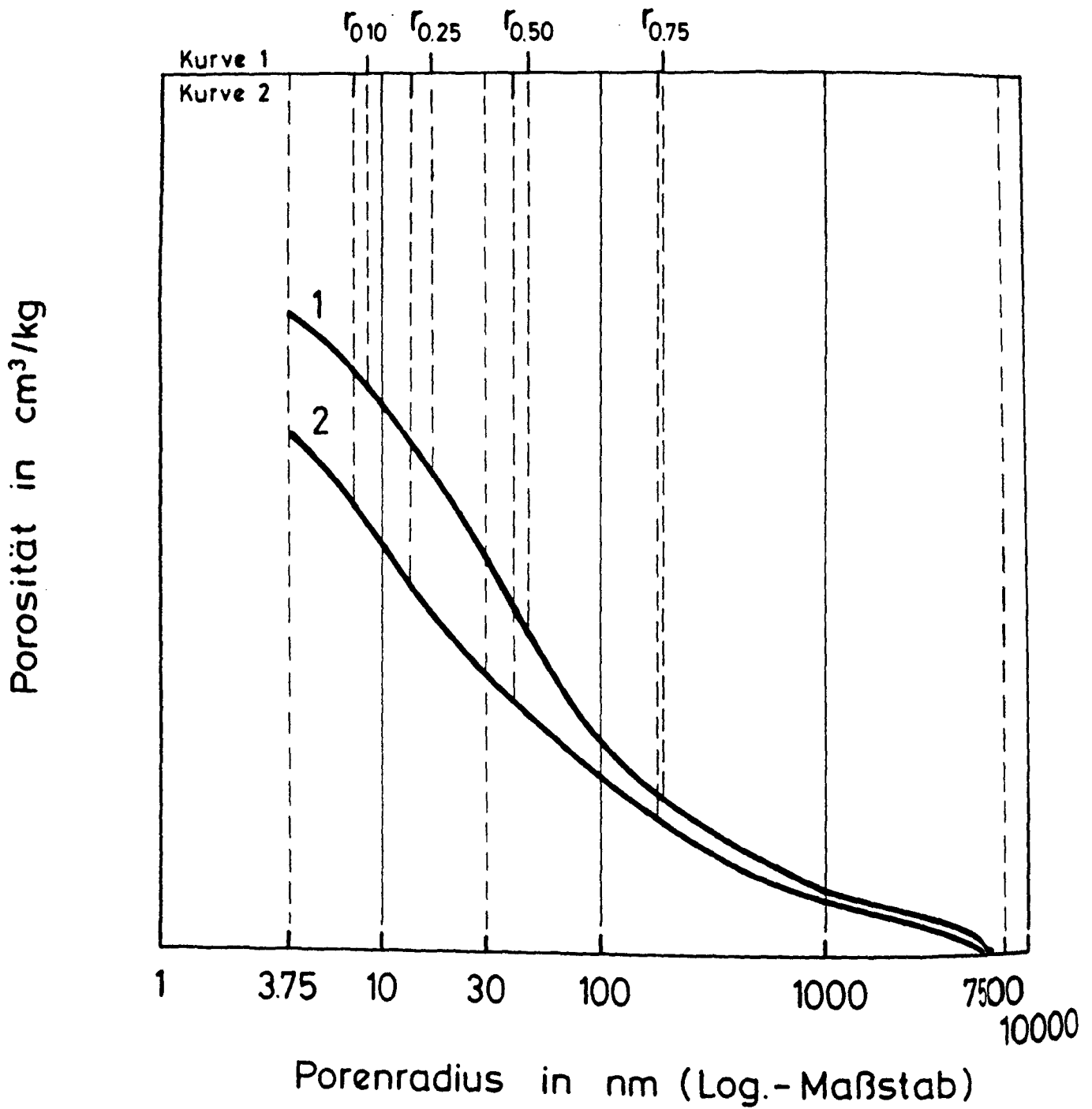


Bild D6: Einfluß des w/z -Wertes auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons und die sich daraus ableitenden Konsequenzen bezüglich der Veränderung der Fraktalradien ($w/z(\text{Kurve 1}) > w/z(\text{Kurve 2})$).

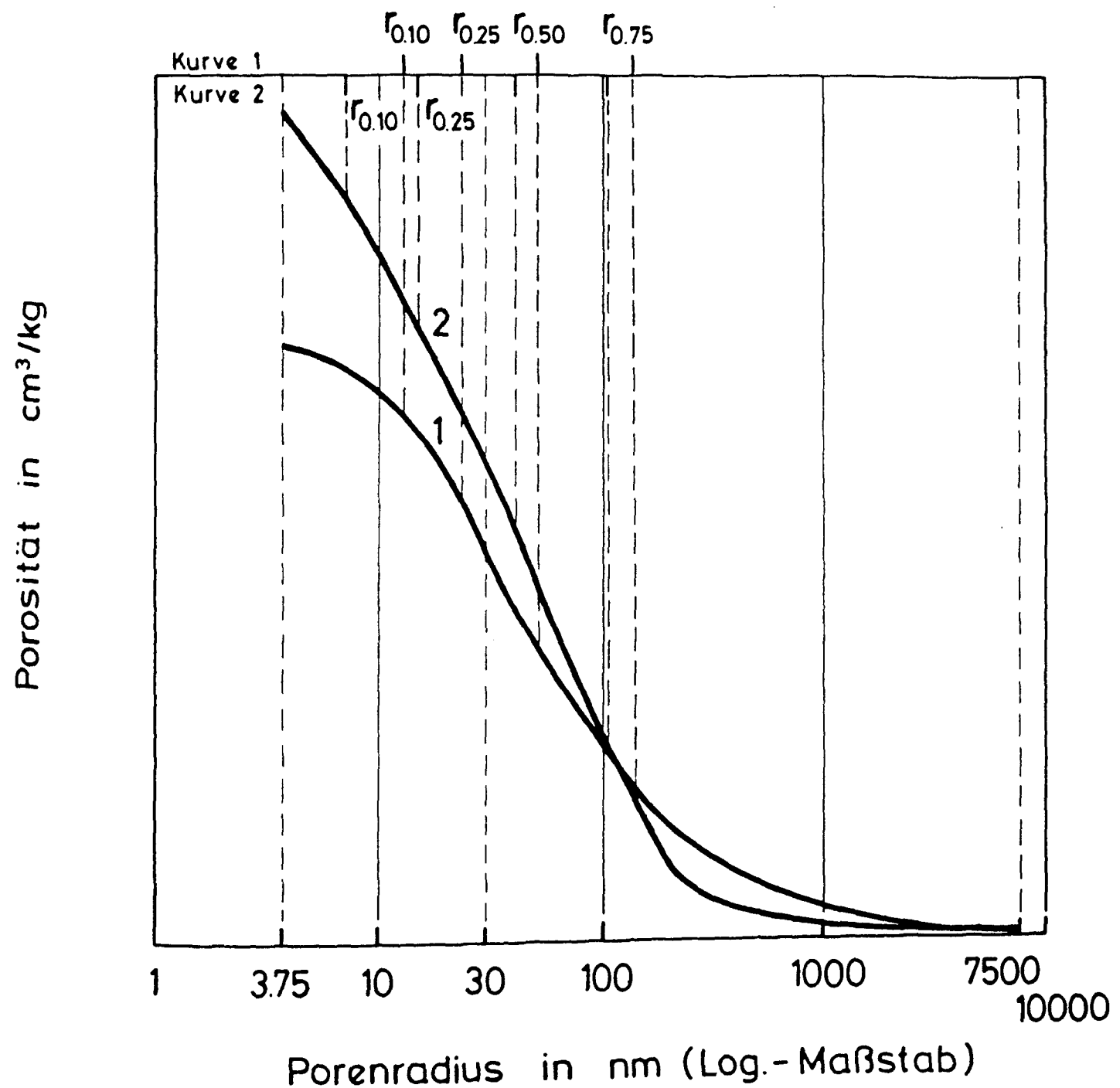


Bild D7: Einfluß der Sieblinie auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons und die sich daraus ableitenden Konsequenzen bezüglich der Veränderung der Fraktalradien (Größtkorndurchmesser(Kurve 1) < Größtkorndurchmesser(Kurve 2)).

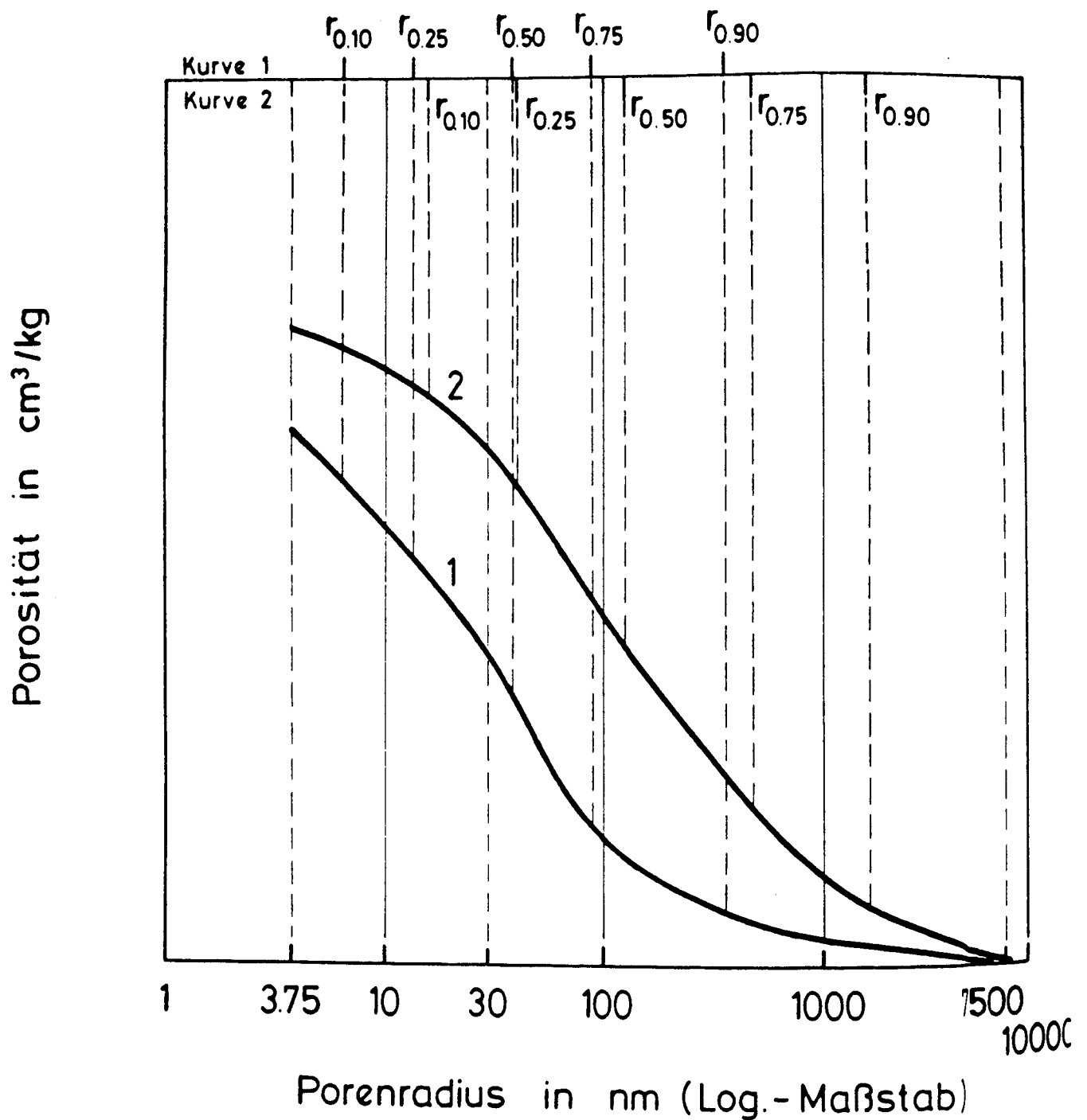


Bild D8: Einfluß des Alters und der Wandtiefe auf die Porosität und Porenradienverteilung des Betons und die sich daraus ableitenden Konsequenzen bezüglich der Veränderung der Fraktalradien (Kurve 1 repräsentiert den älteren und/oder weiter im Wandinneren befindlichen Beton).

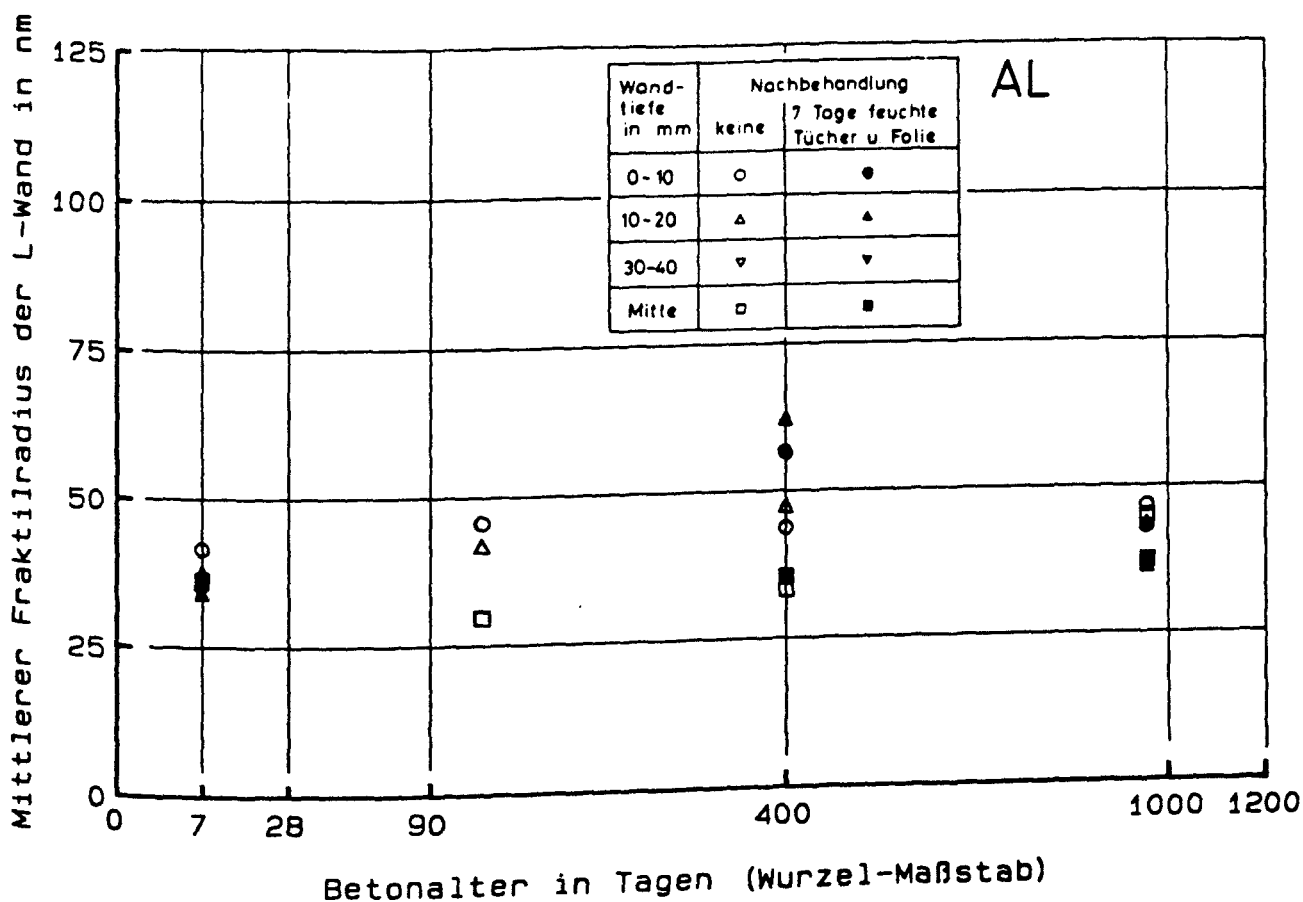
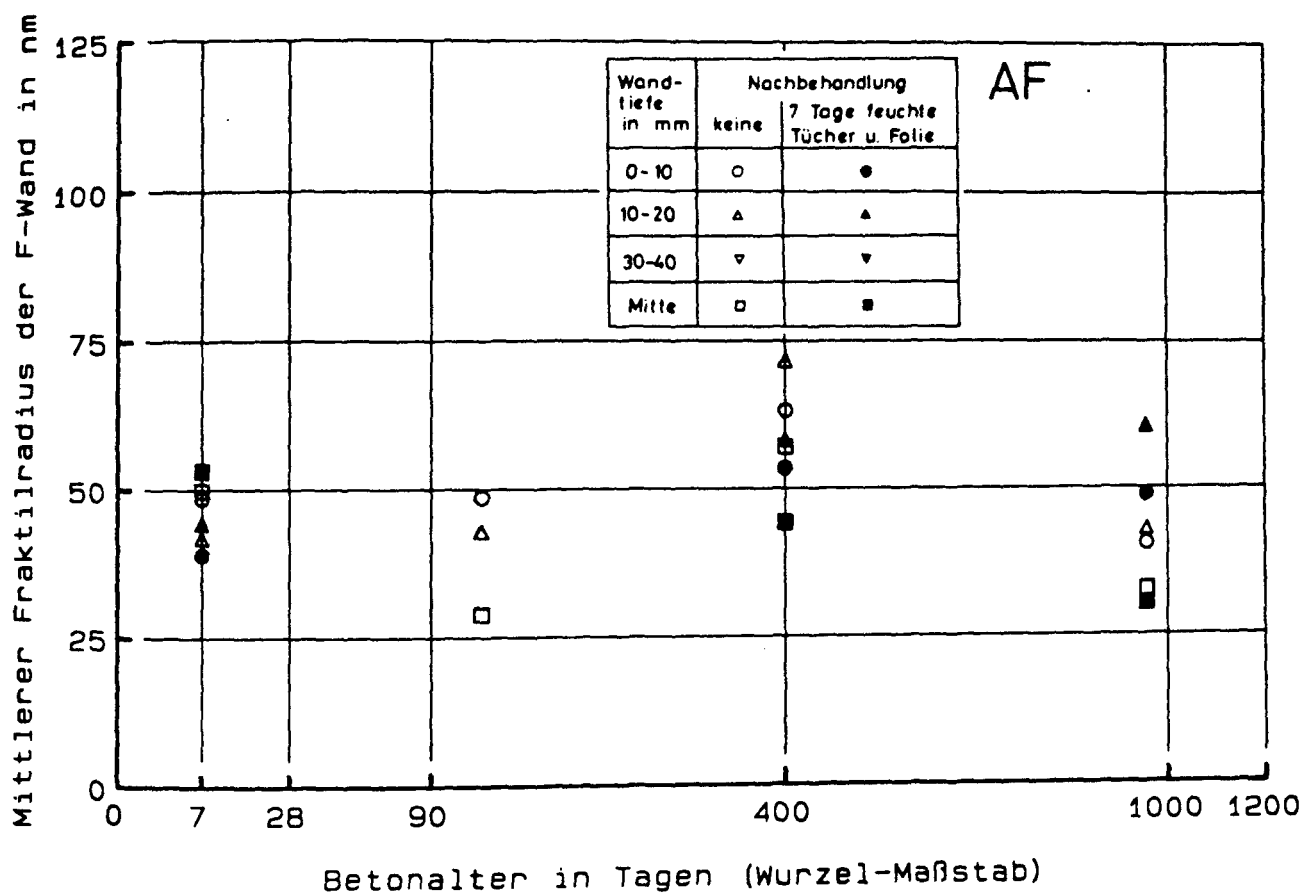


Bild D9

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius der Wände AF(oben) und AL(unten) in Abhängigkeit der Wandtiefe und der Nachbehandlung.

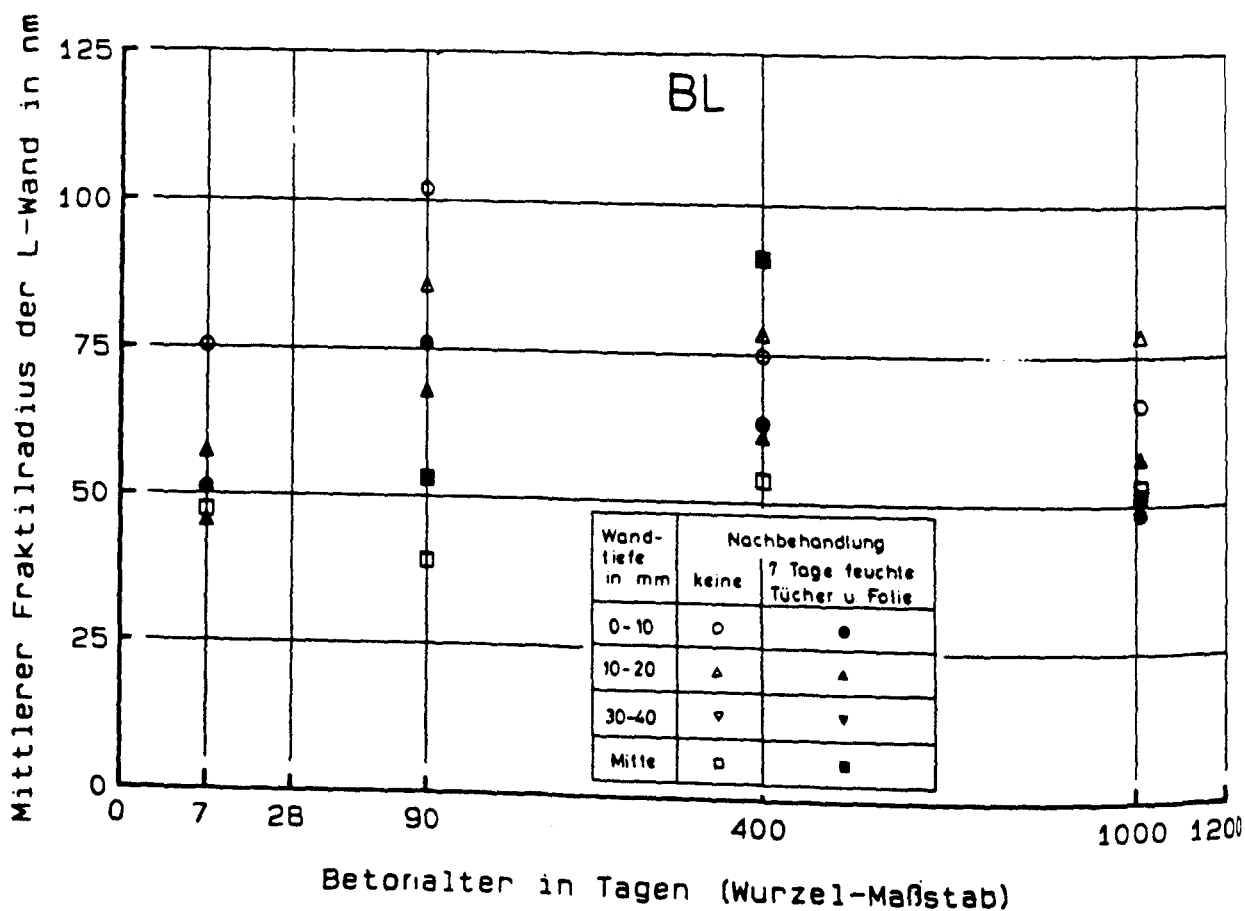
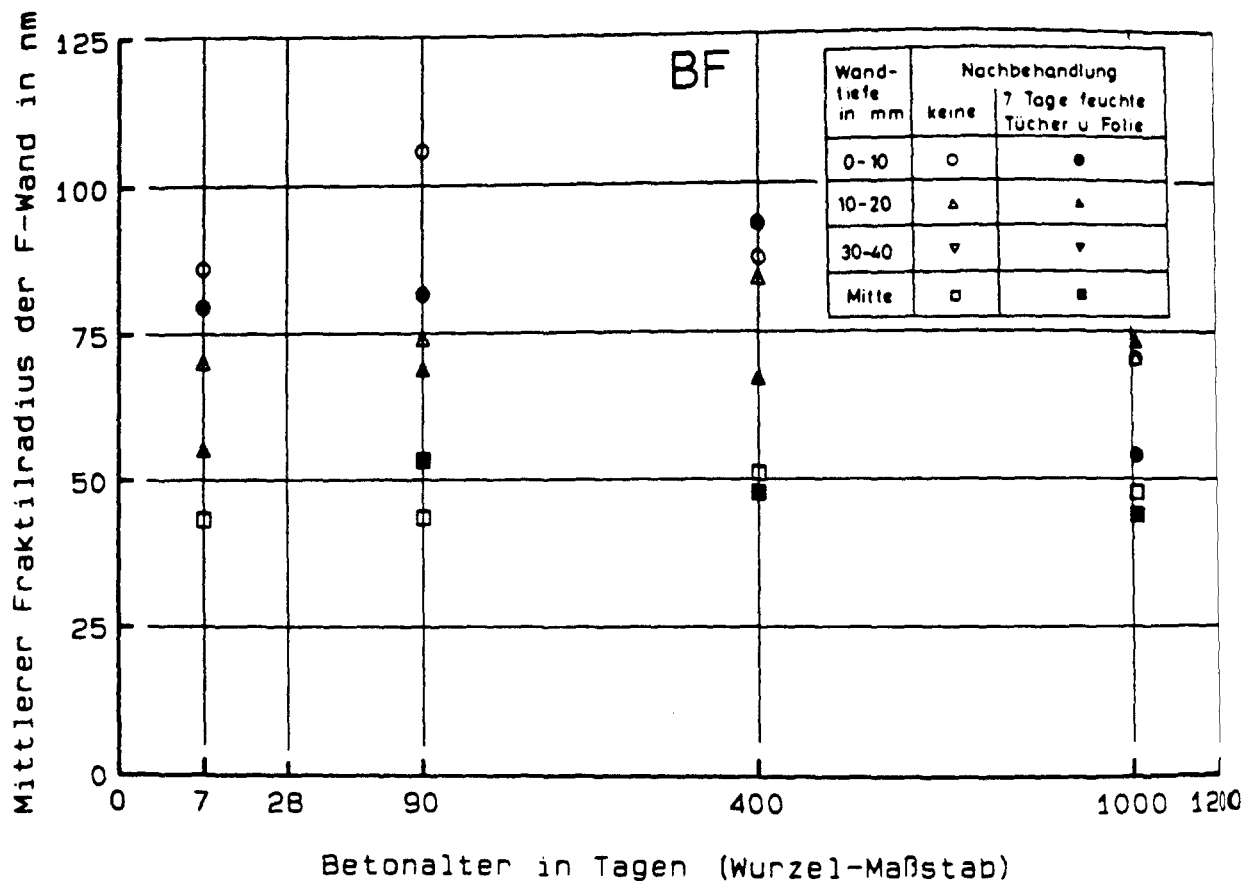
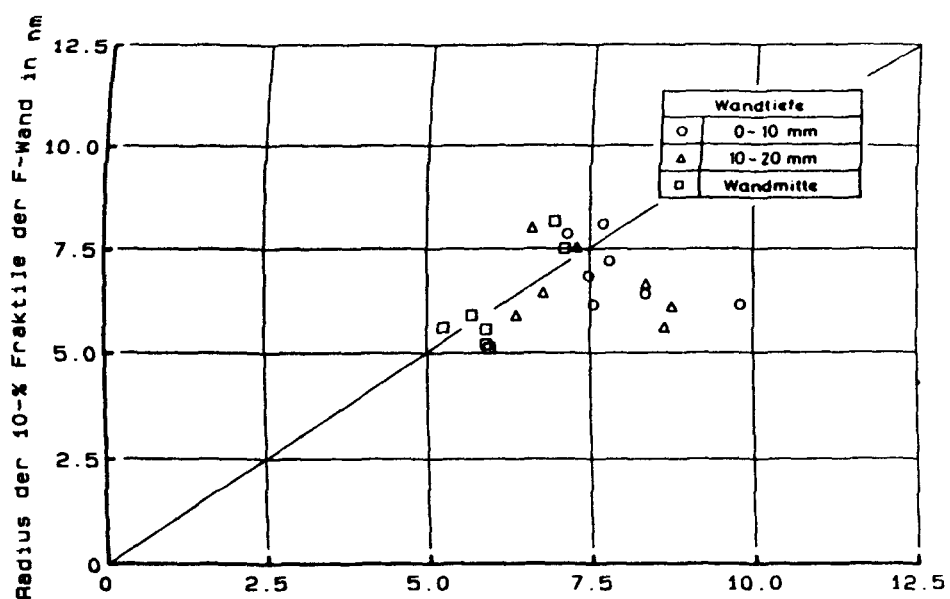
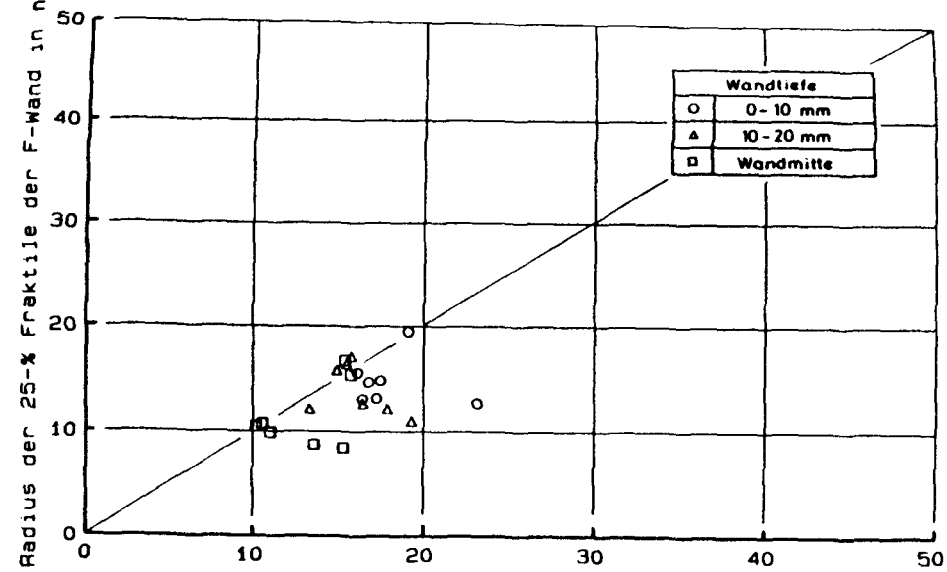


Bild D10

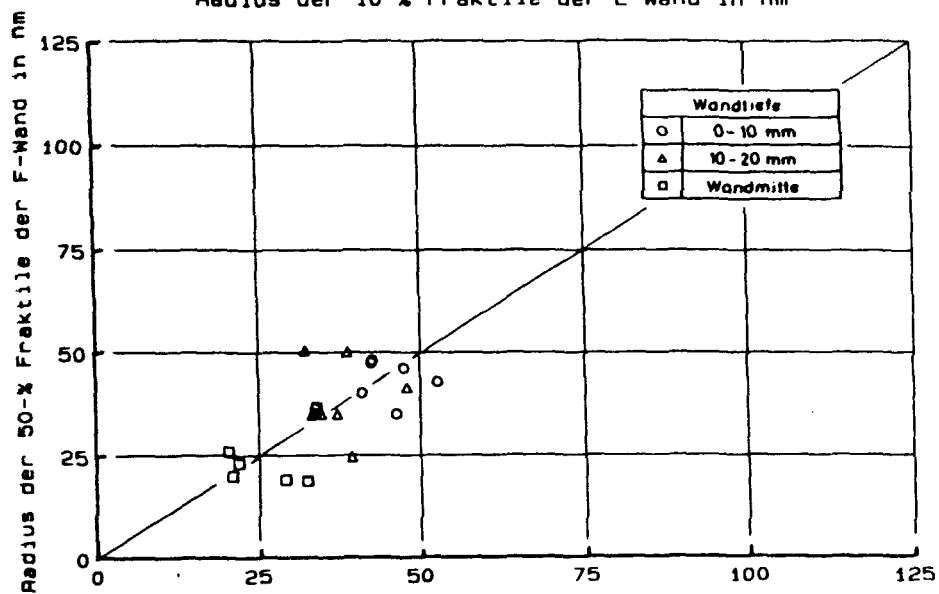
Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius der Wände BF(oben) und BL(unten) in Abhängigkeit der Wandtiefe und der Nachbehandlung.



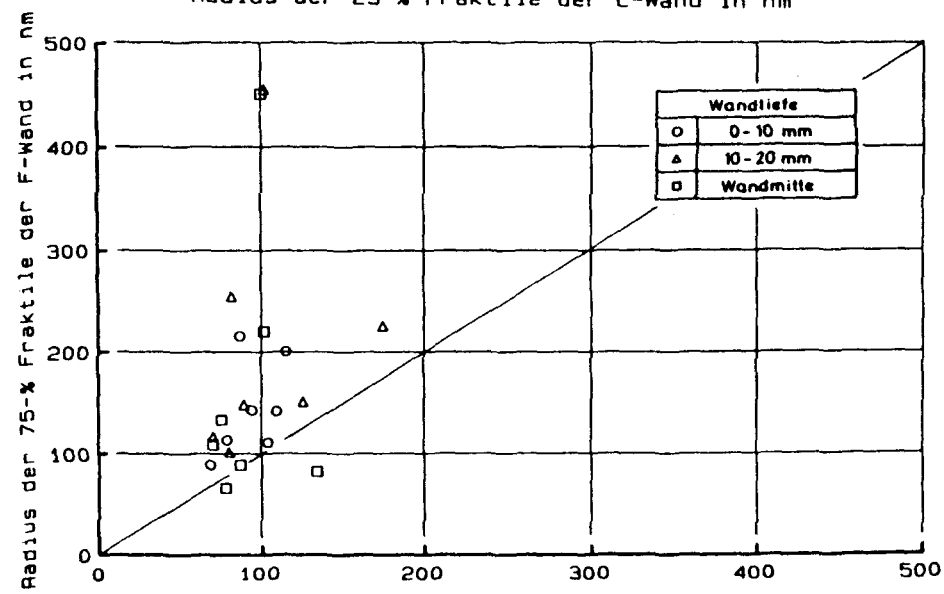
Radius der 10-% Fraktile der L-Wand in nm



Radius der 25-% Fraktile der L-Wand in nm



Radius der 50-% Fraktile der L-Wand in nm



Radius der 75-% Fraktile der L-Wand in nm

Bild D11

Gegenüberstellung der Fraktilradien der im Freien und im Labor aufgestellten Wände für Wandpaar A getrennt nach den untersuchten Wandtiefen.

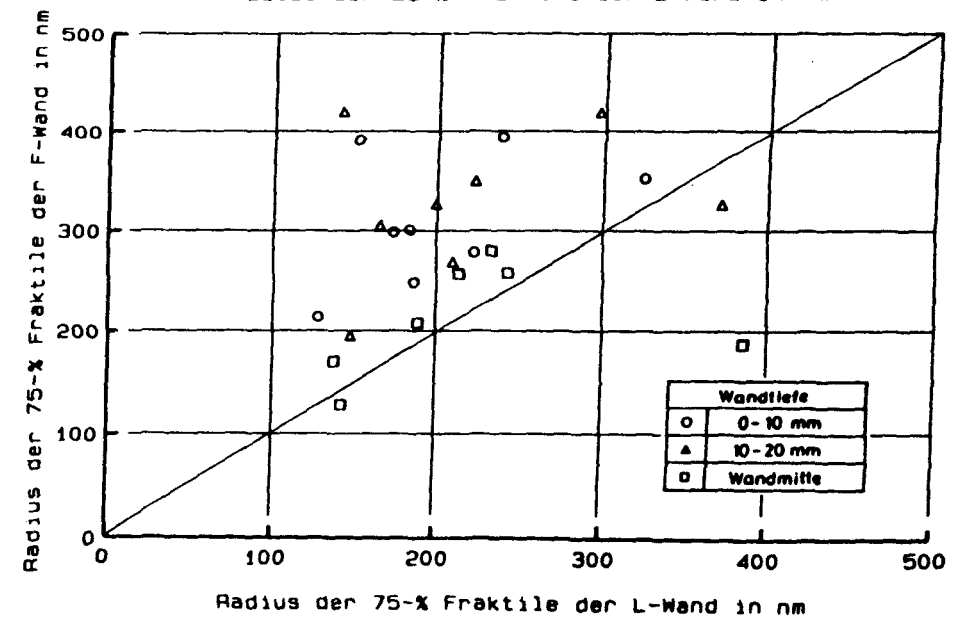
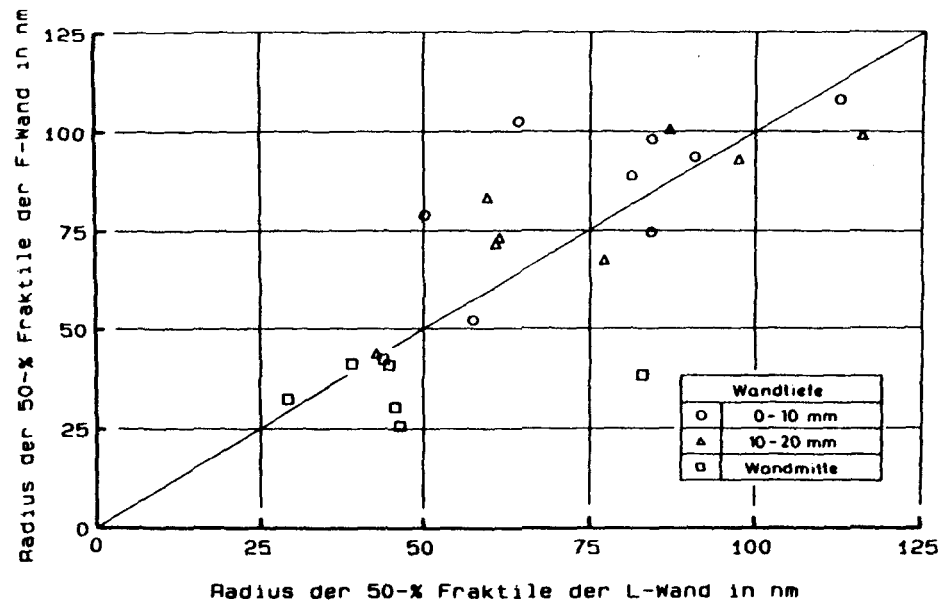
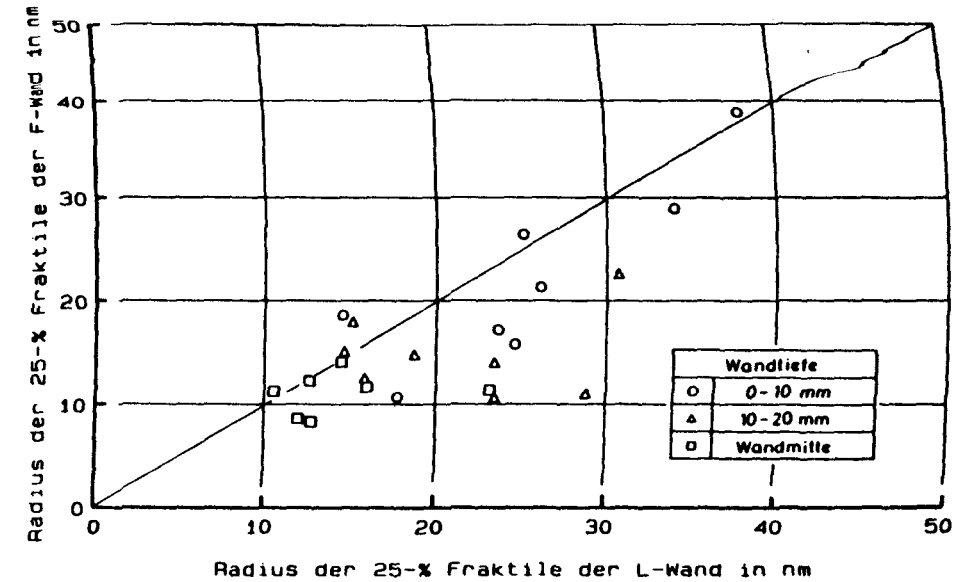
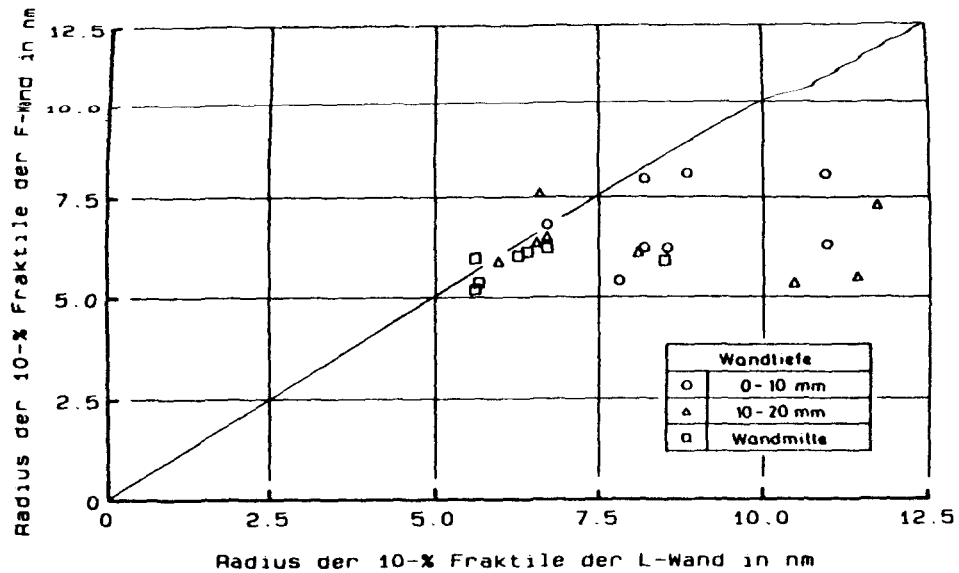


Bild D12

Gegenüberstellung der Fraktilradien der im Freien und im Labor aufgestellten Wände für Wandpaar B getrennt nach den untersuchten Wandtiefen.

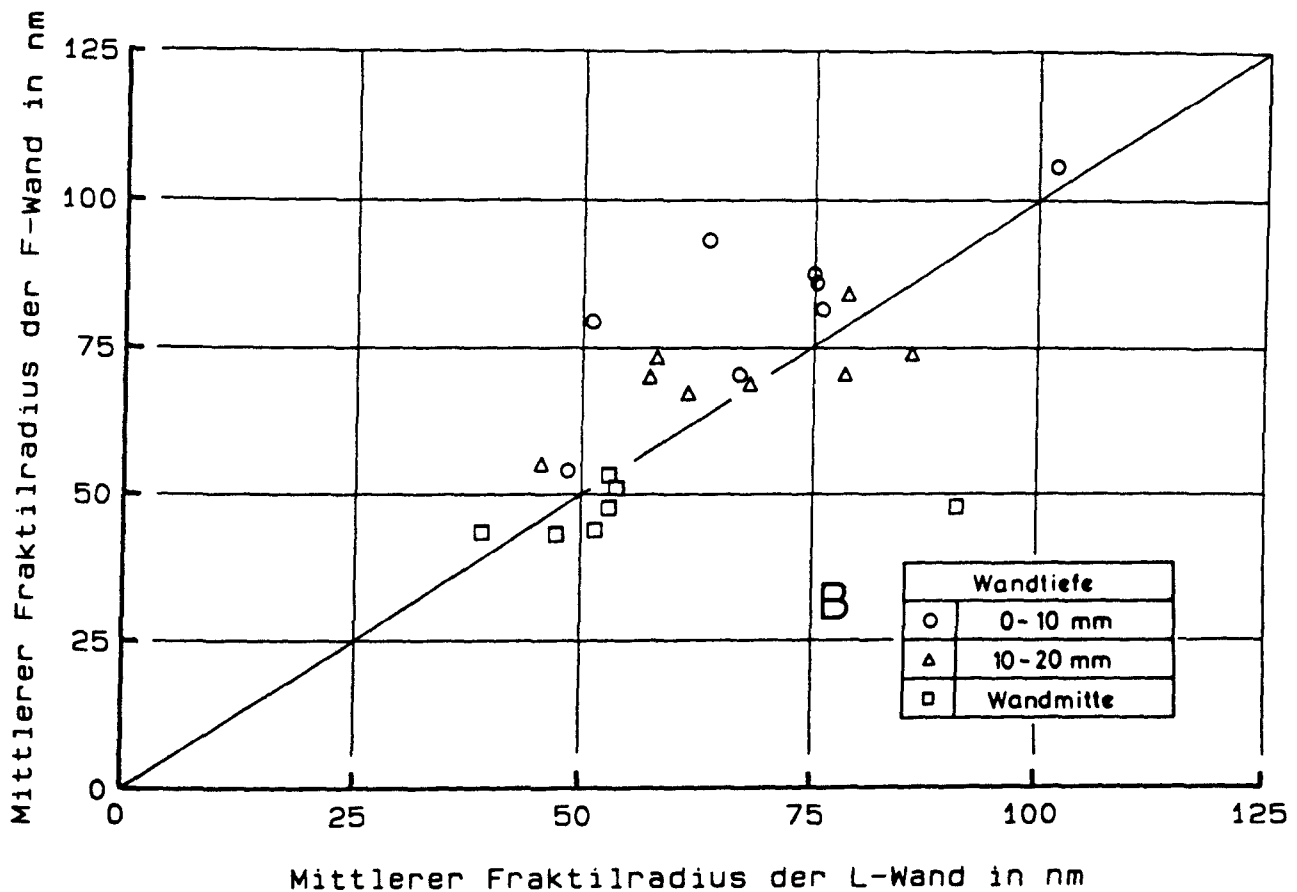
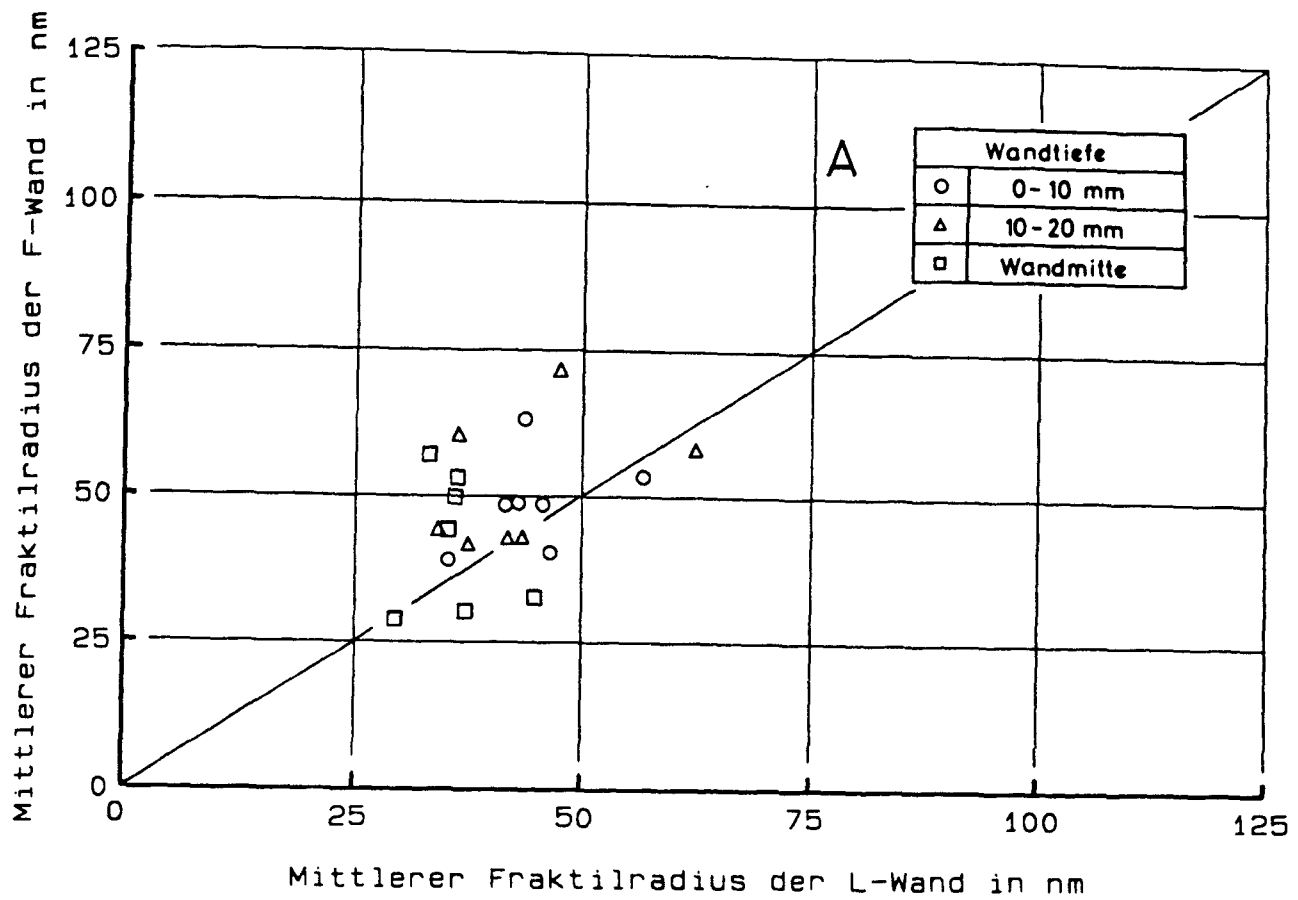


Bild D13

Gegenüberstellung der Werte des mittleren Fraktalradius der im Freien und im Labor aufgestellten Wände A (obere Bildhälfte) und B (untere Bildhälfte) getrennt nach den untersuchten Wandtiefen.

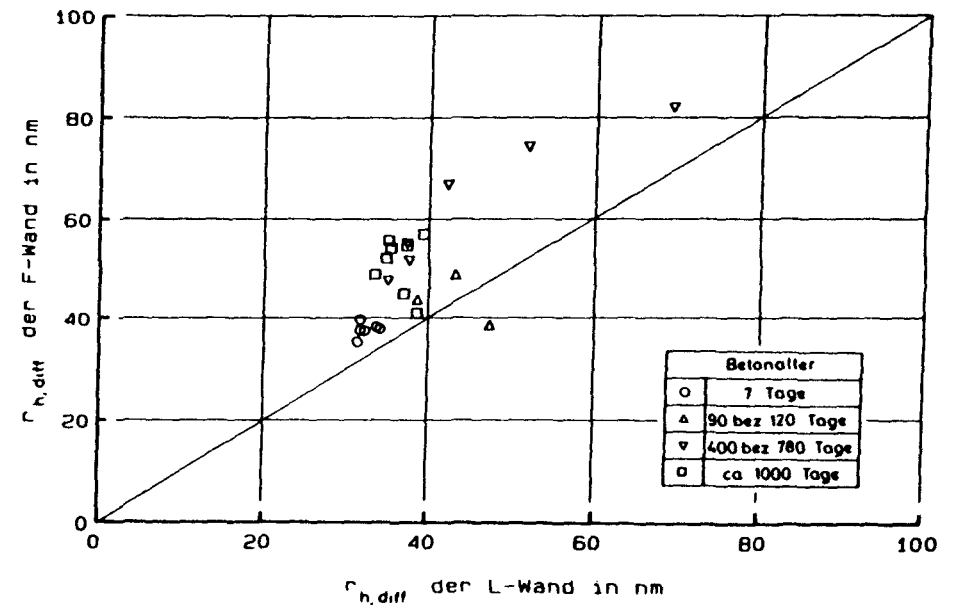
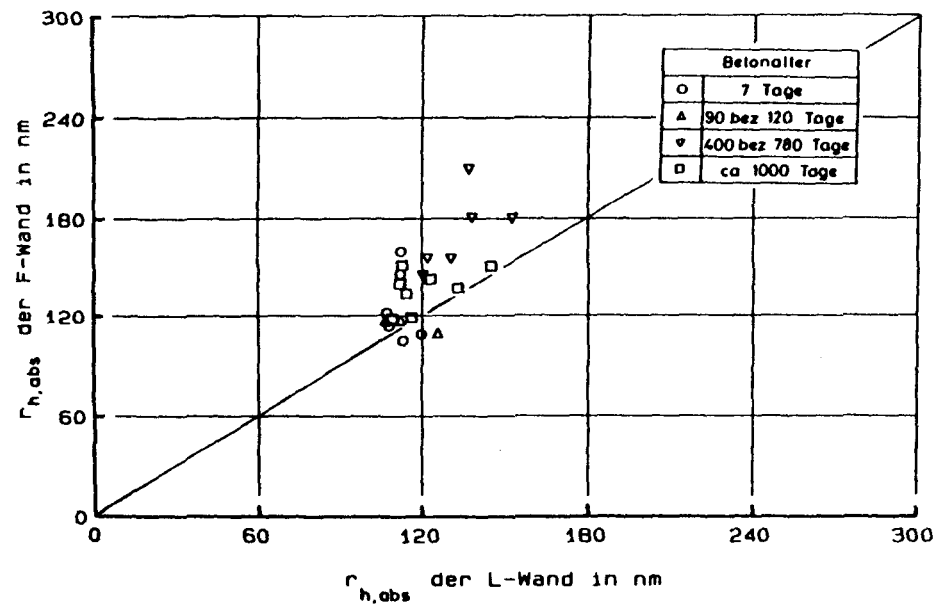
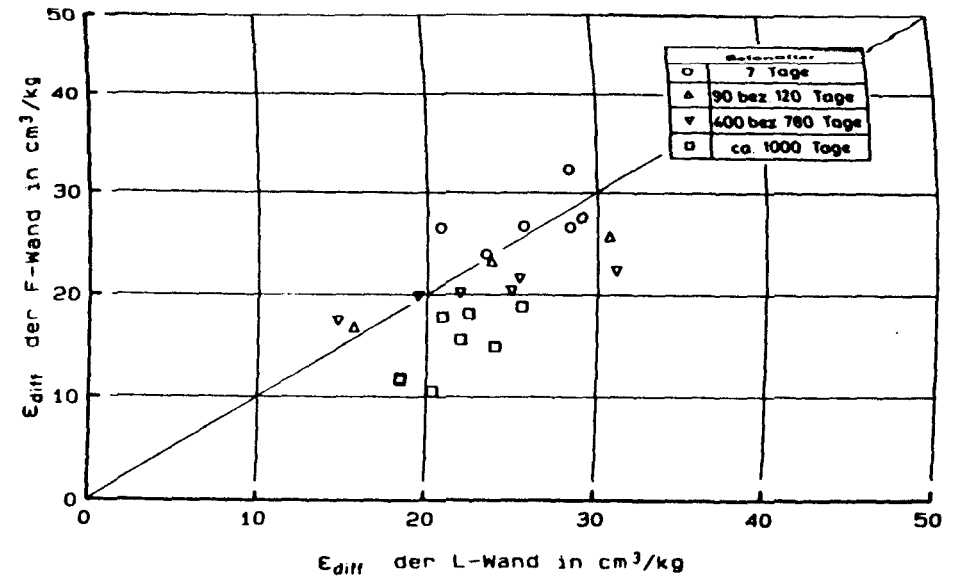
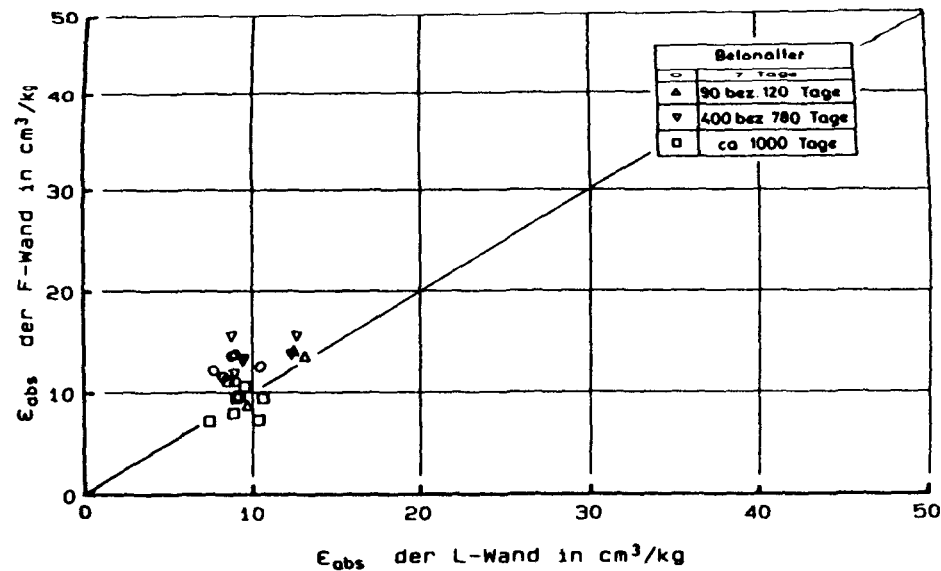


Bild D14

Gegenüberstellung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung für die im Freien und im Labor aufgestellten Wände von Wandpaar A getrennt nach den untersuchten Betonaltern.

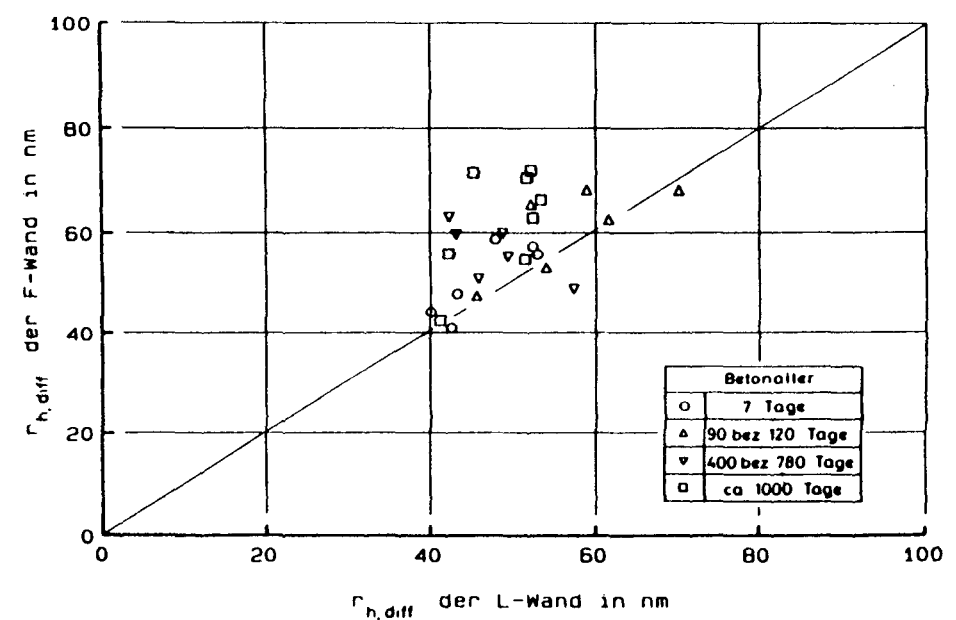
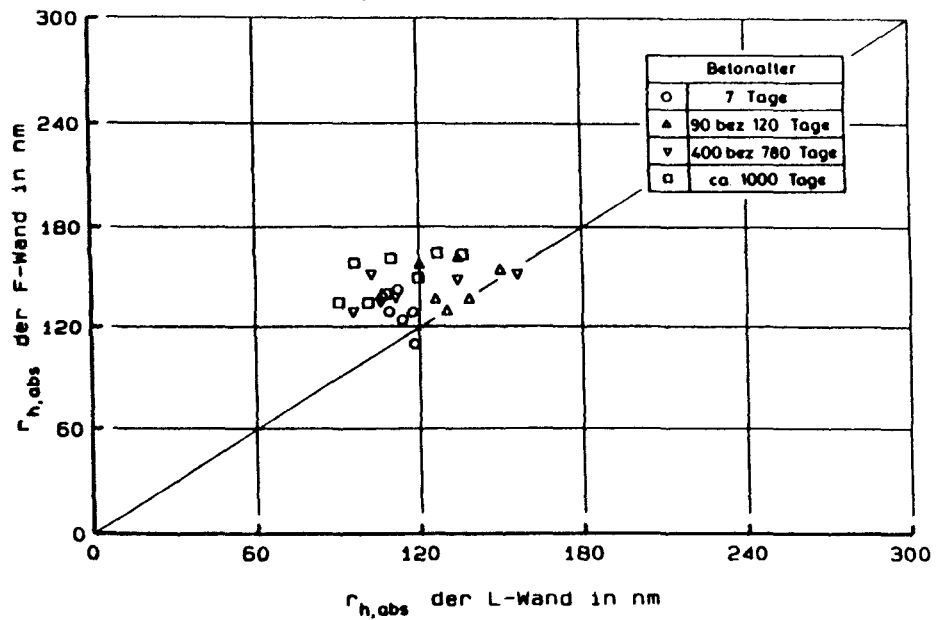
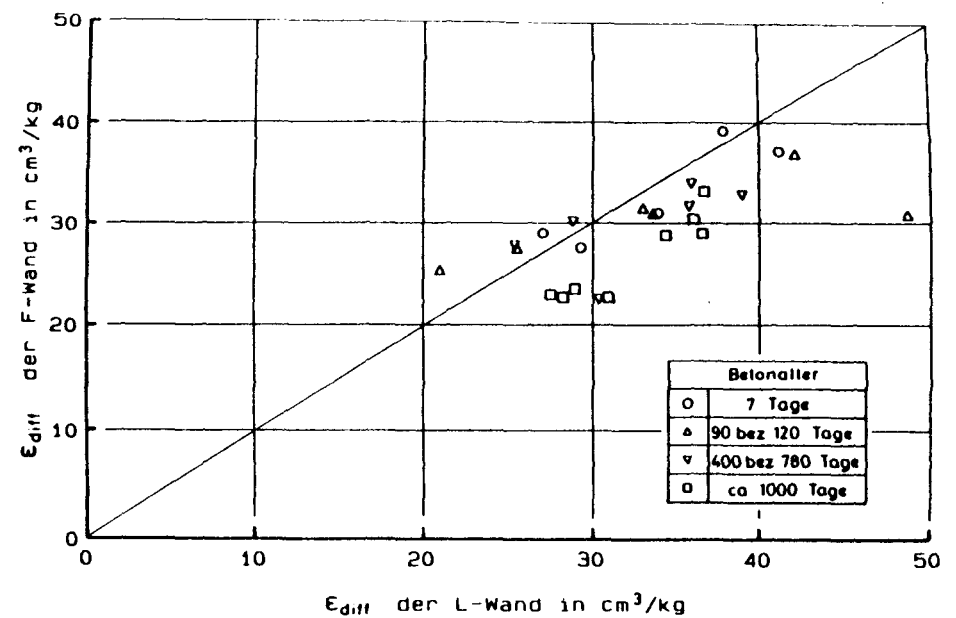
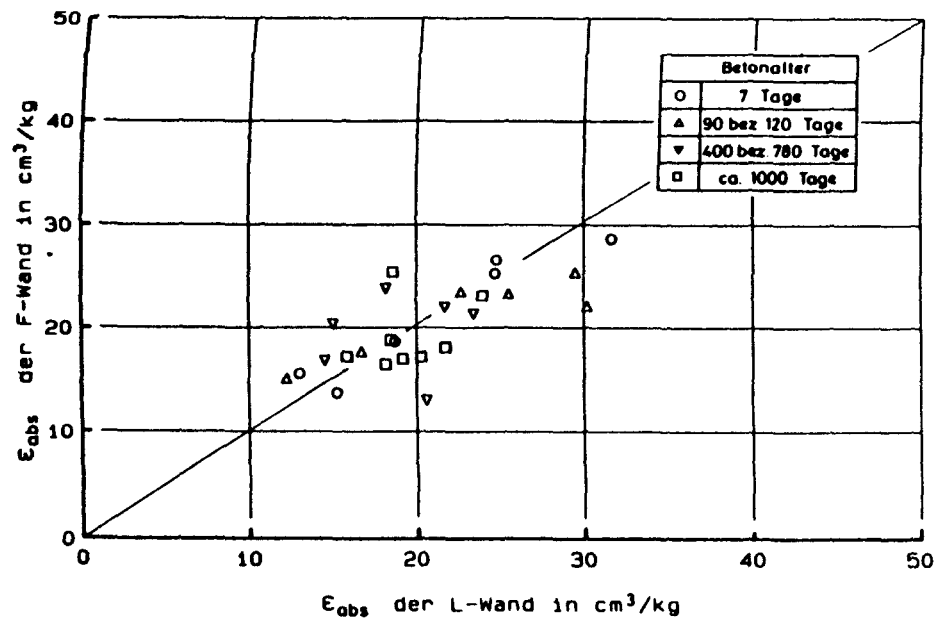


Bild D15

Gegenüberstellung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung für die im Freien und im Labor aufgestellten Wände von Wandpaar B getrennt nach den untersuchten Betonaltern.

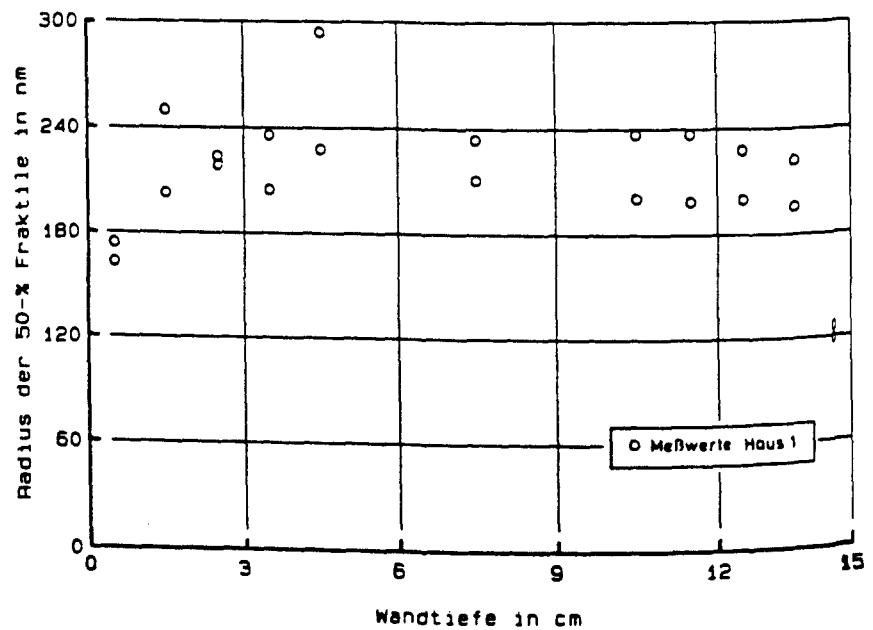
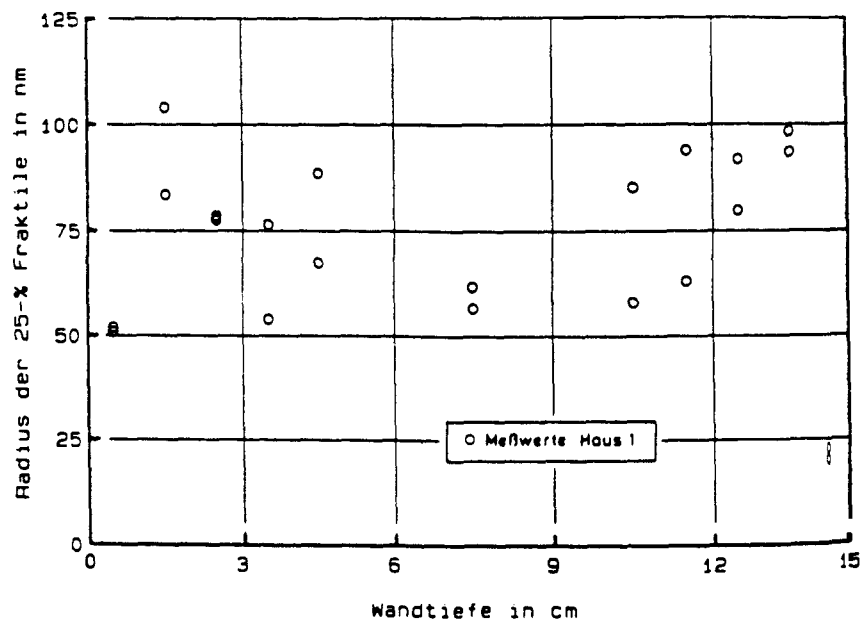
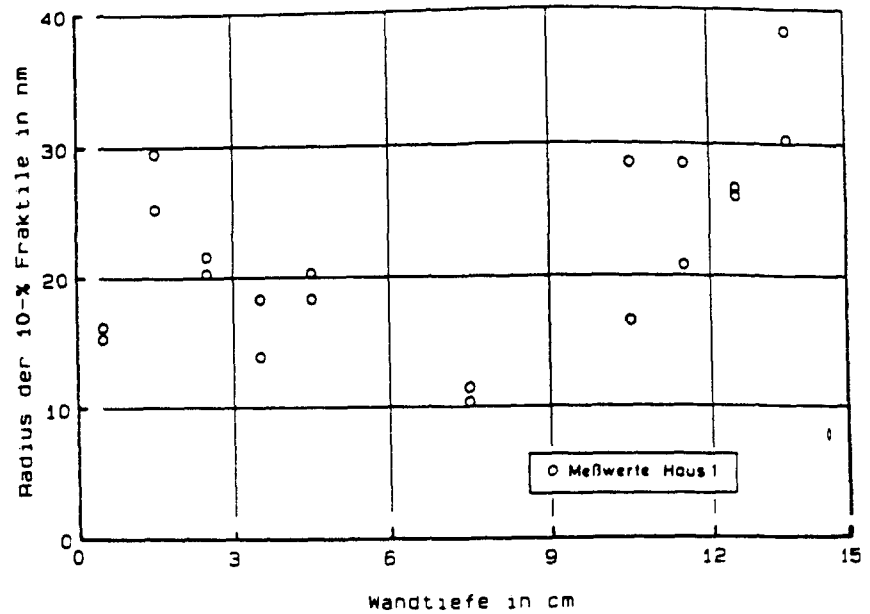


Bild D16

Abhängigkeit der Fraktilradien $r_{0,10}$, $r_{0,25}$ und $r_{0,50}$ von der Wandtiefe für die Westwand von Versuchshaus 1 aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

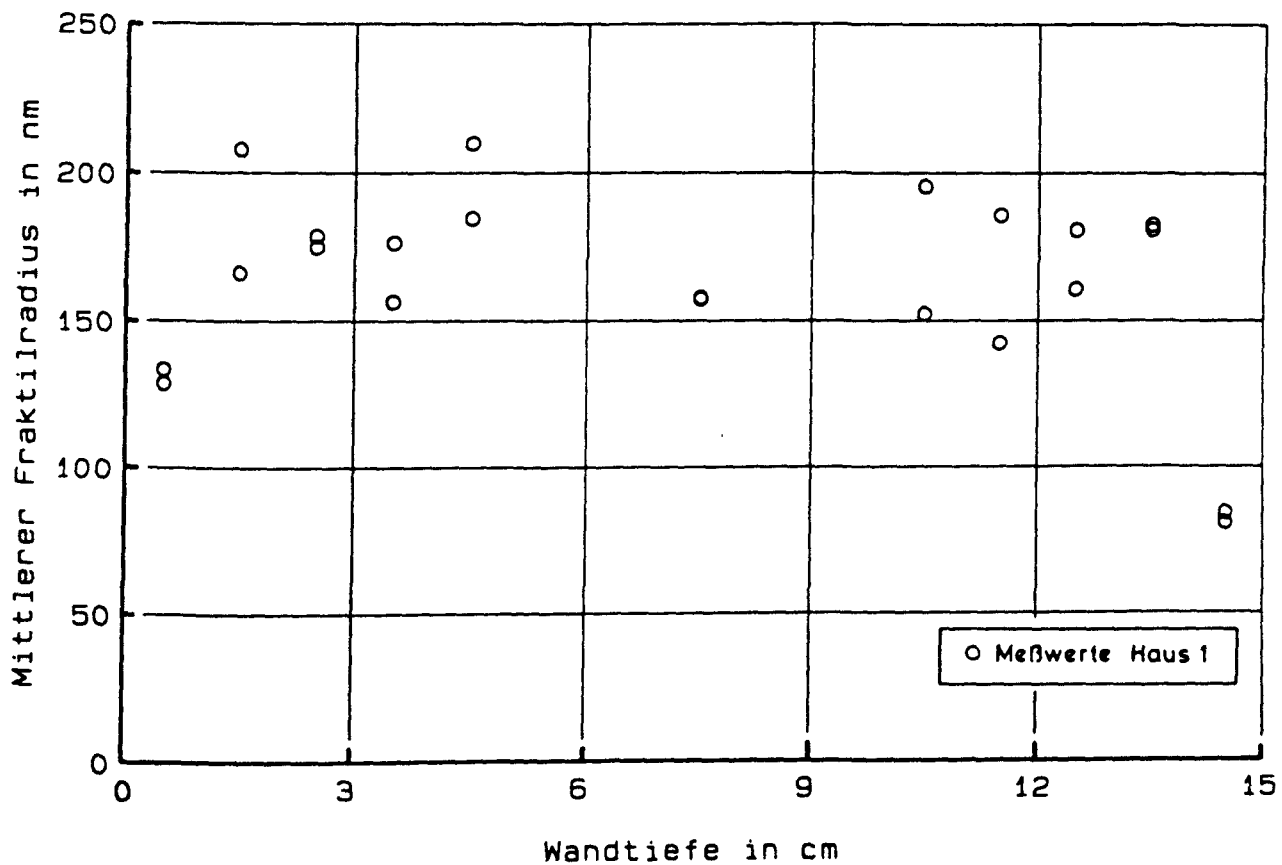
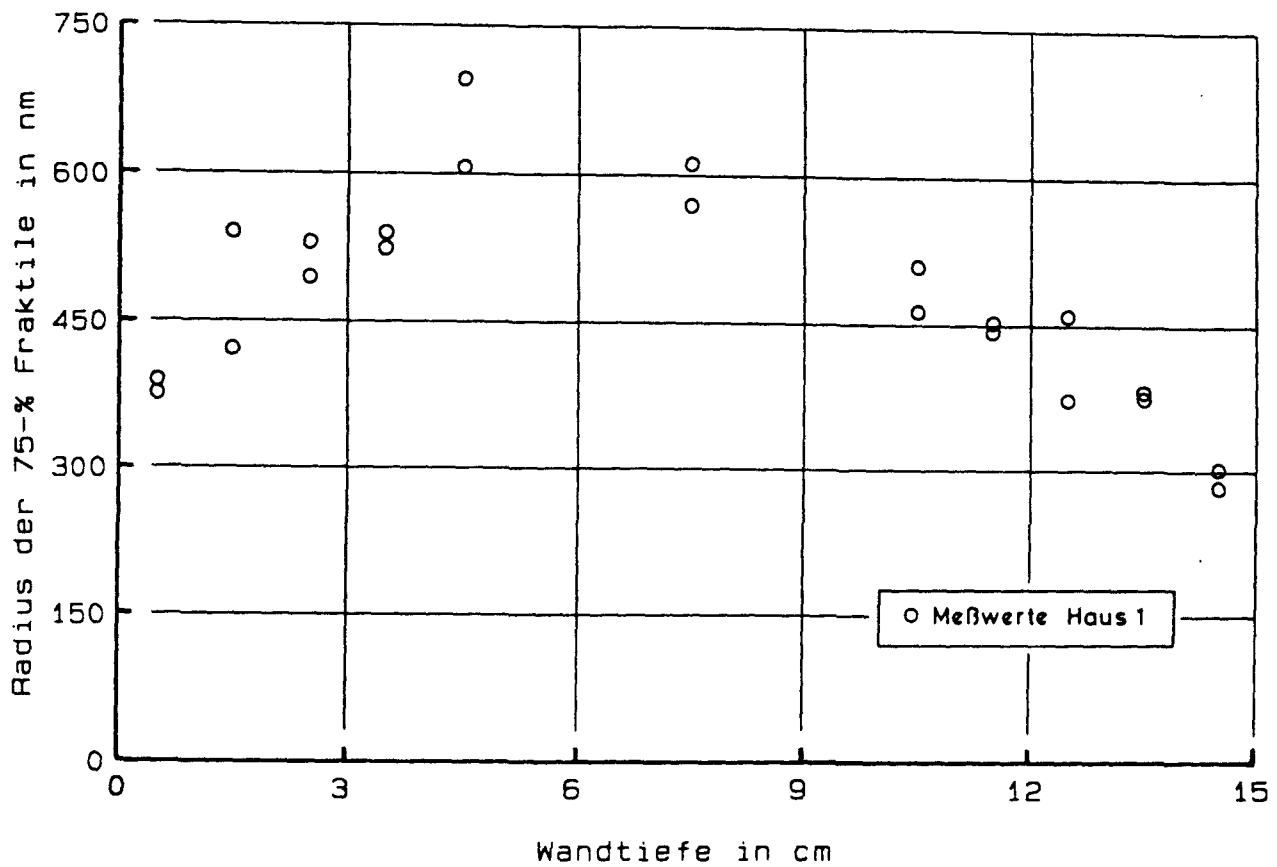


Bild D17

Abhängigkeit des Fraktilradius $r_{0,75}$ und des mittleren Fraktilradius r_g von der Wandtiefe für die Westwand von Versuchshaus 1 aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

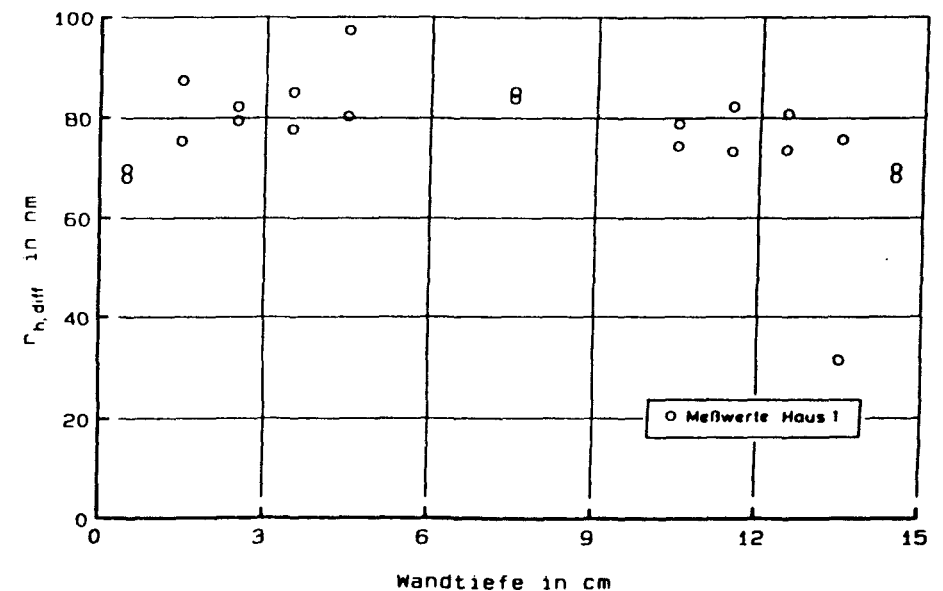
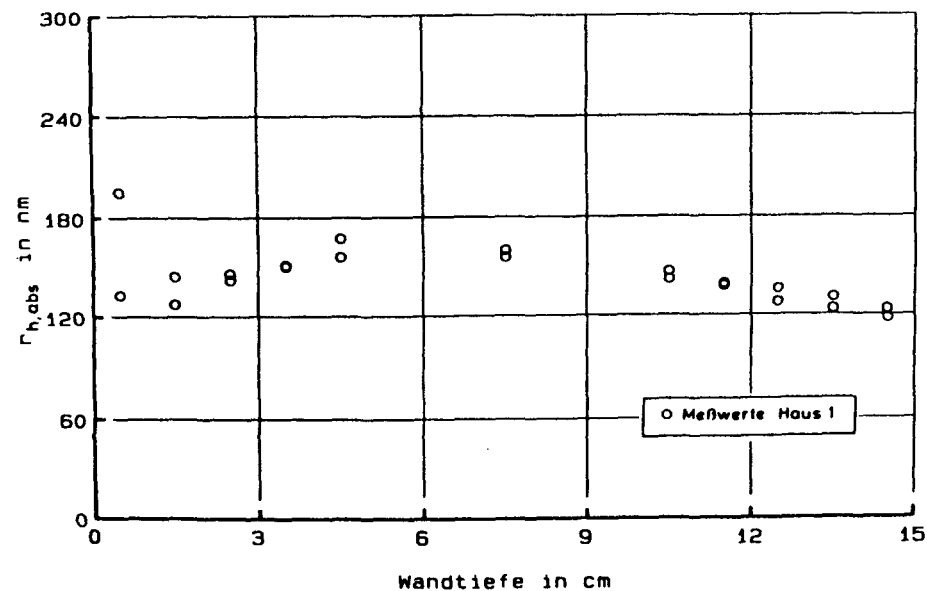
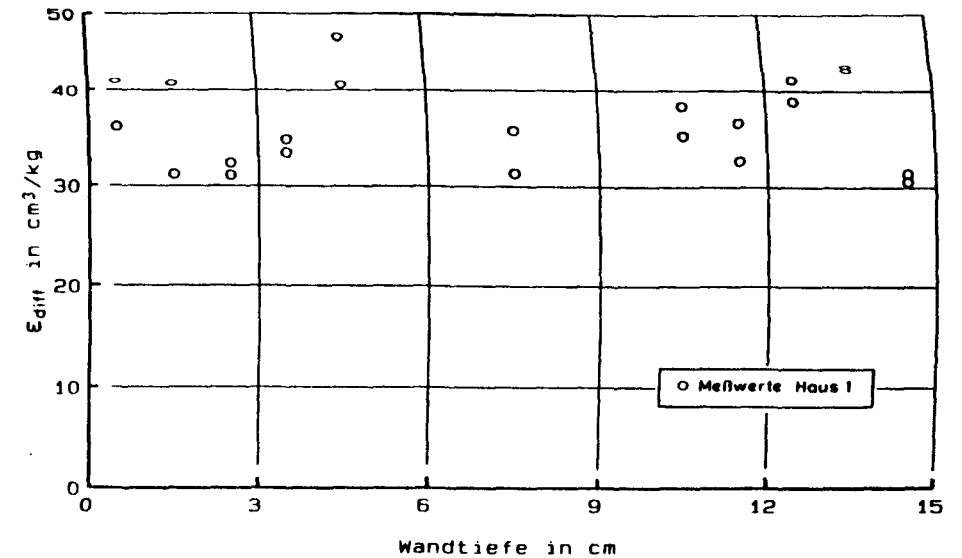
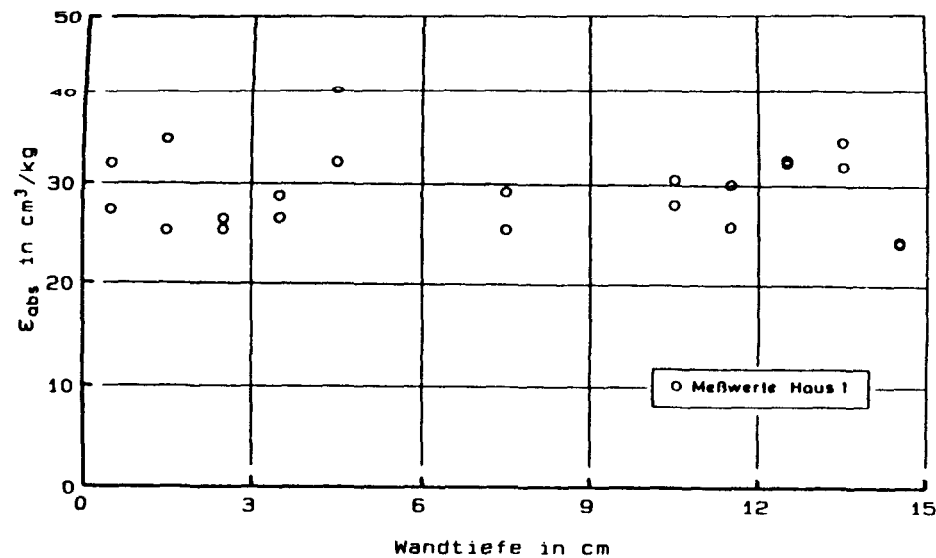


Bild D18

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe für die Westwand von Versuchshaus 1 aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

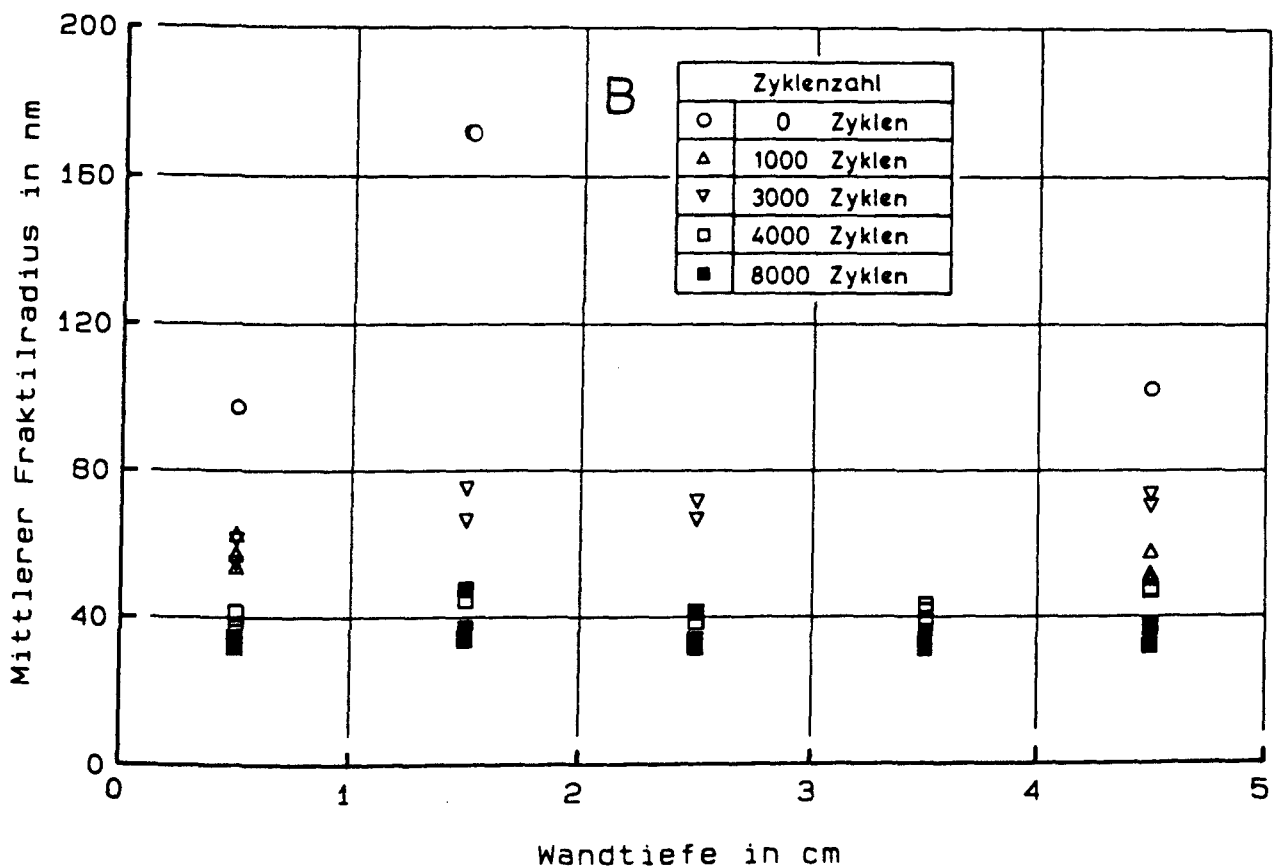
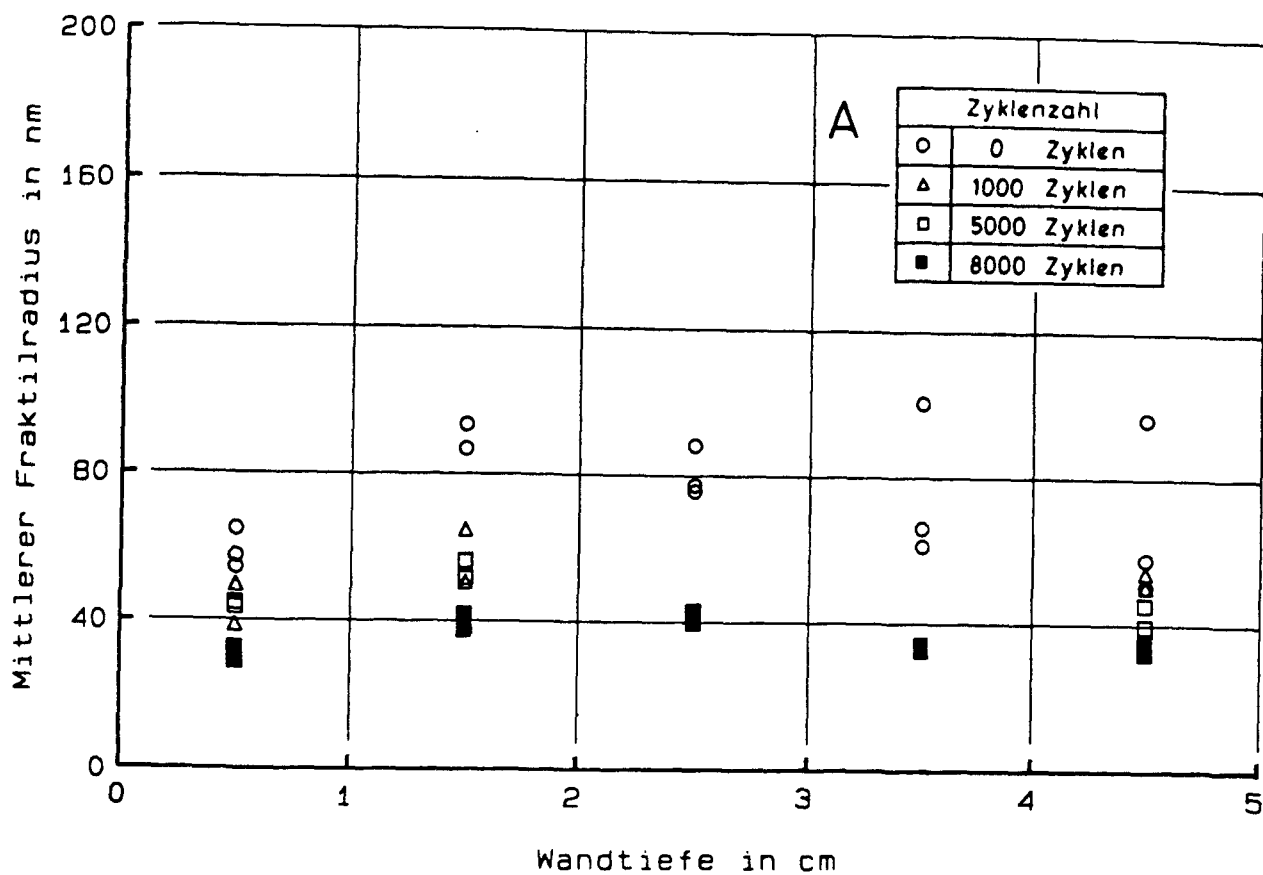


Bild D19

Abhängigkeit des mittleren Fraktalradius r_g von der Wandtiefe für die künstlich bewitterten Kleinkörper von Wand A (obere Bildhälfte) und Wand B (untere Bildhälfte) getrennt nach der Anzahl der aufgetragenen Bewitterungszyklen.

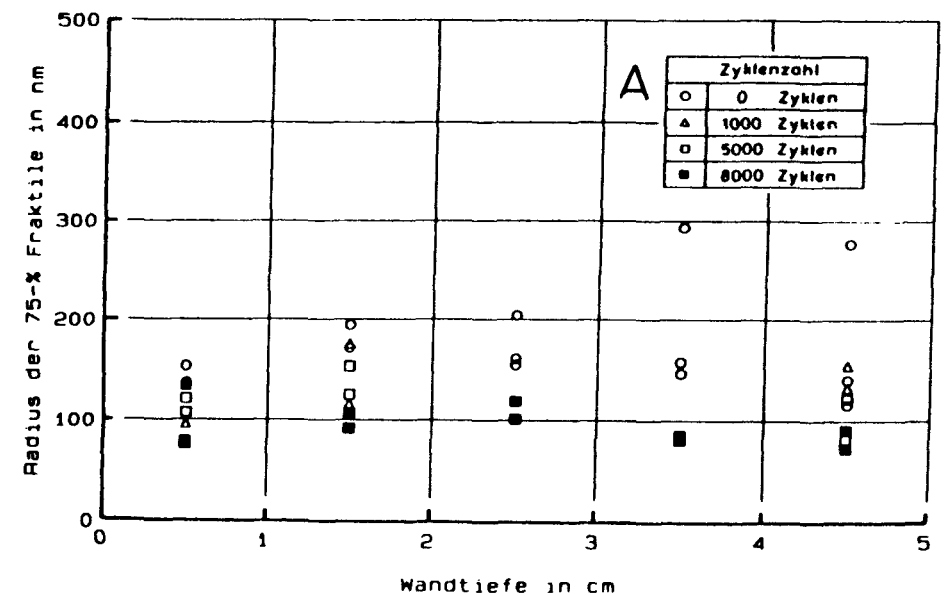
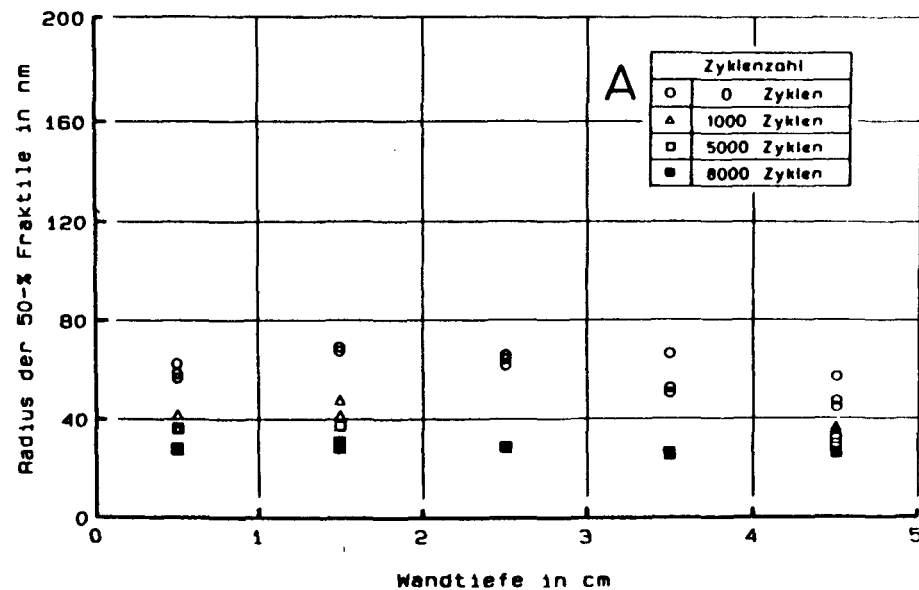
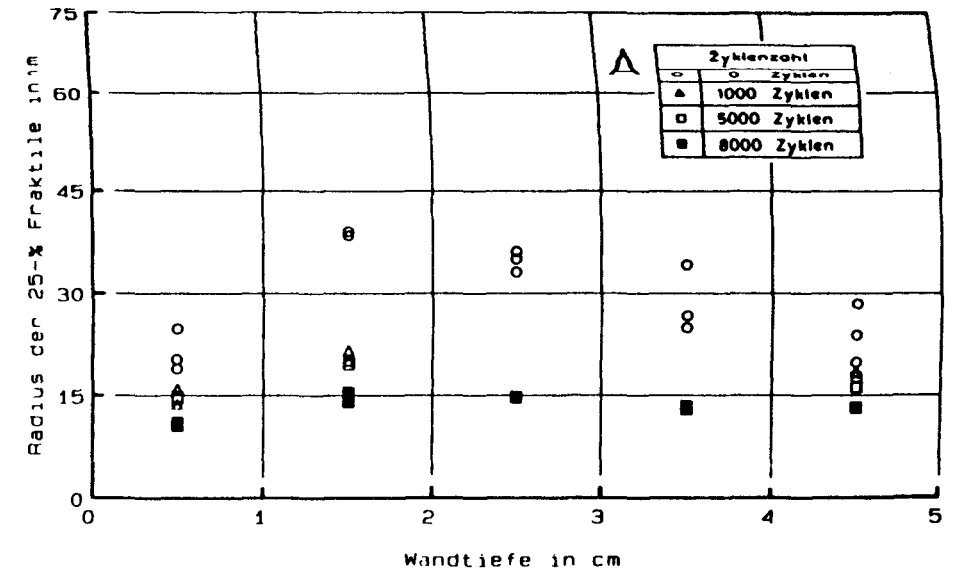
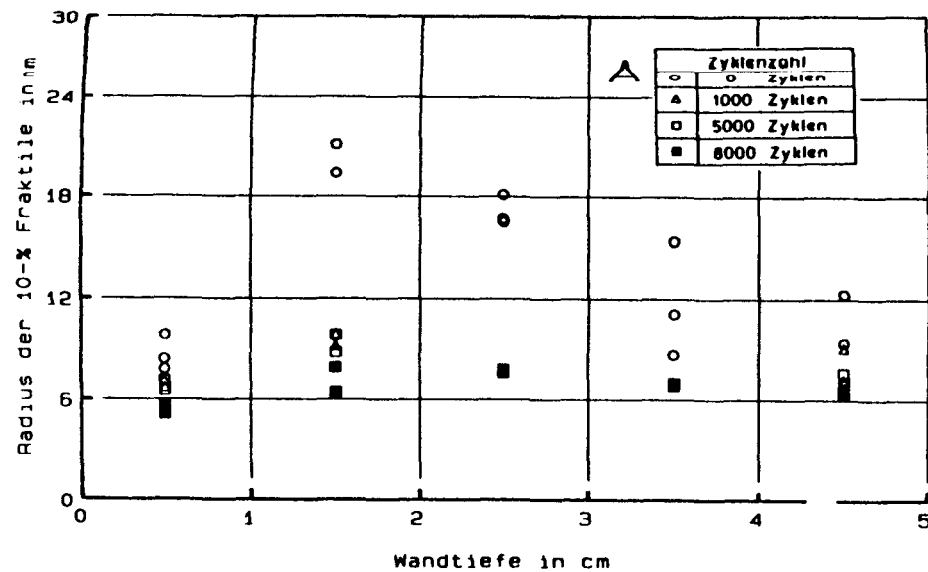


Bild D20

Abhängigkeit der einzelnen Fraktilradien von der Wandtiefe für den künstlich bewitterten Kleinkörper zugehörig zu Wand A getrennt nach der Anzahl der aufgetragenen Bewitterungszyklen.

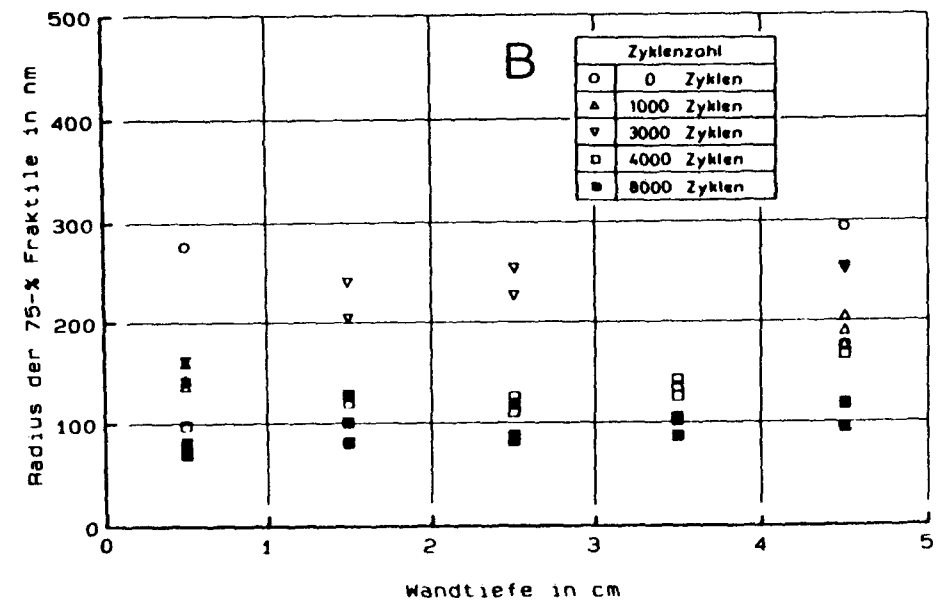
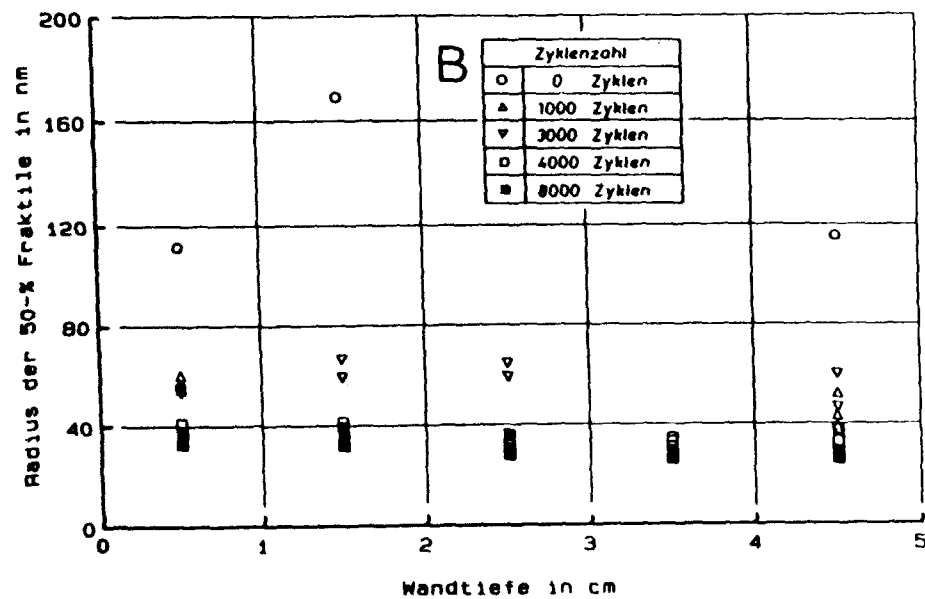
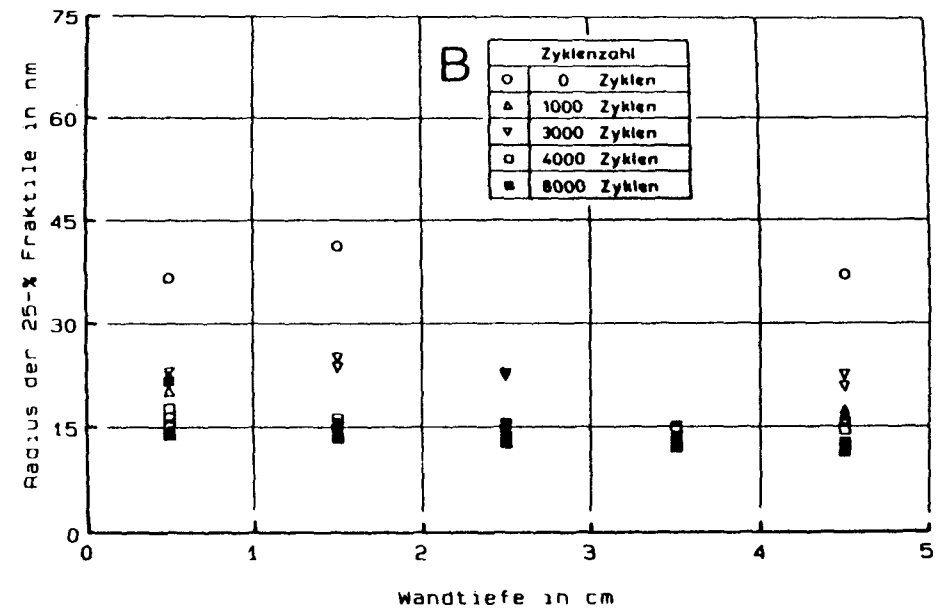
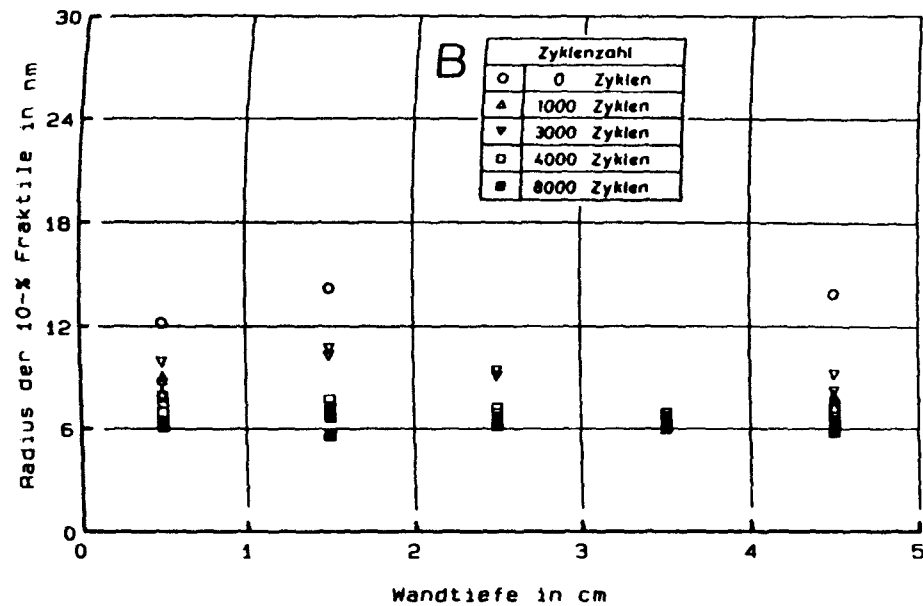


Bild D21

Abhängigkeit der einzelnen Fraktilradien von der Wandtiefe für den künstlich bewitterten Kleinkörper zugehörig zu Wand B getrennt nach der Anzahl der aufgetragenen Bewitterungszyklen.

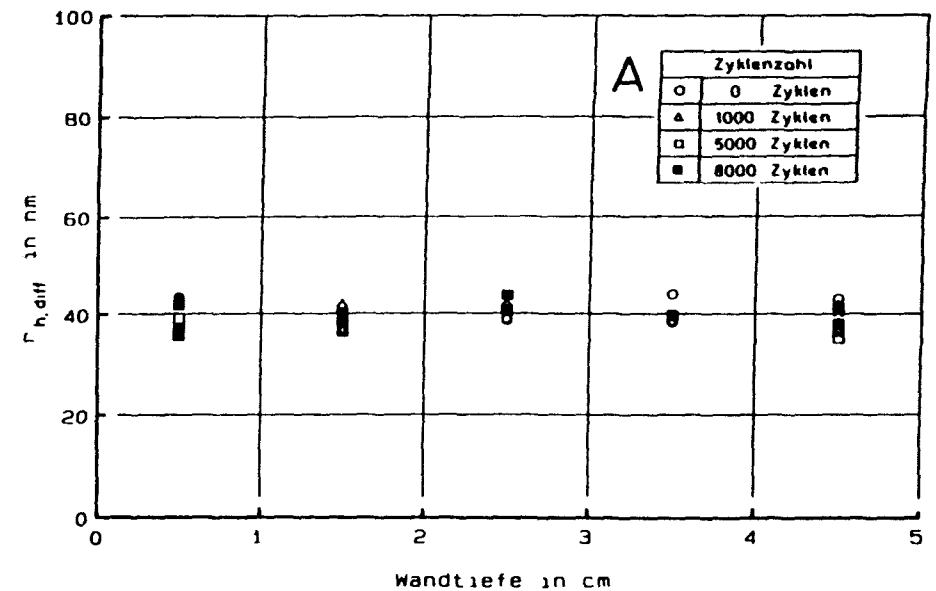
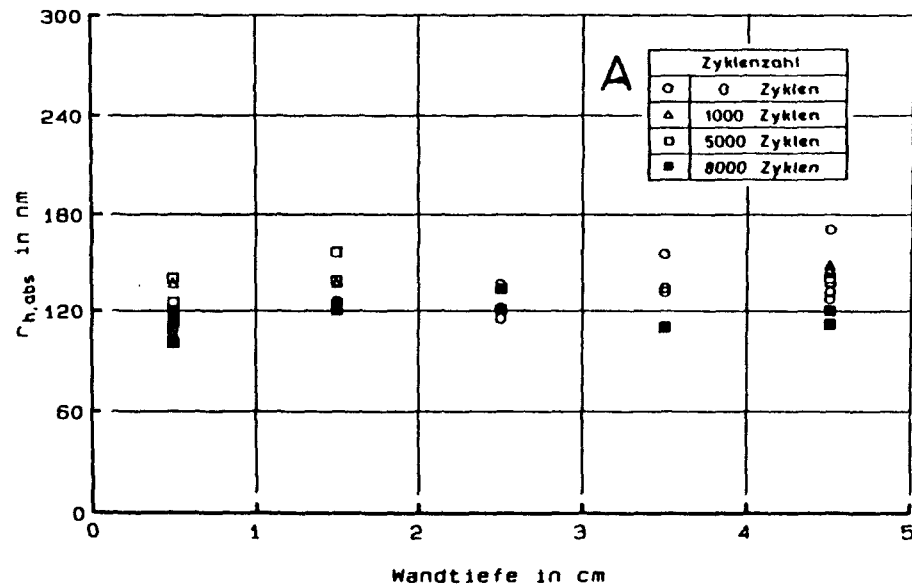
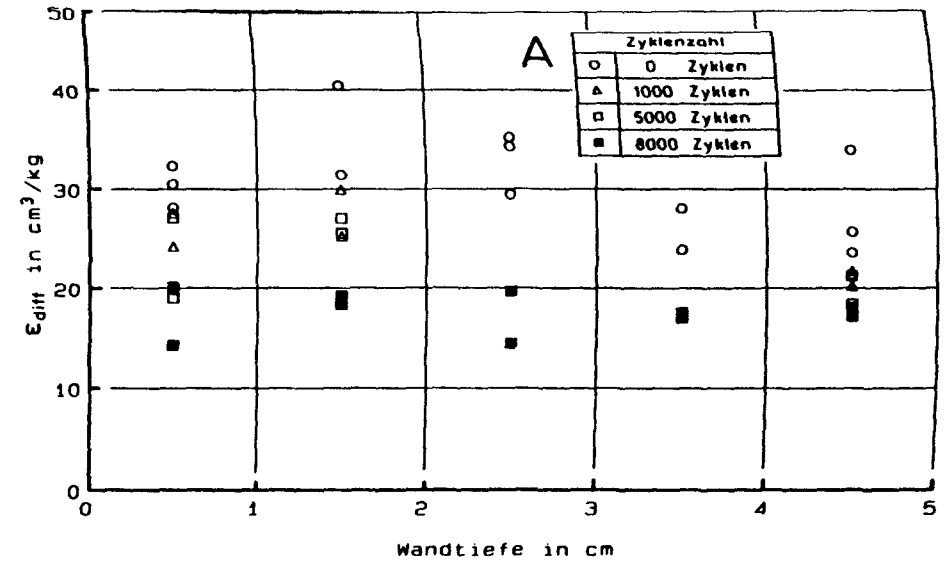
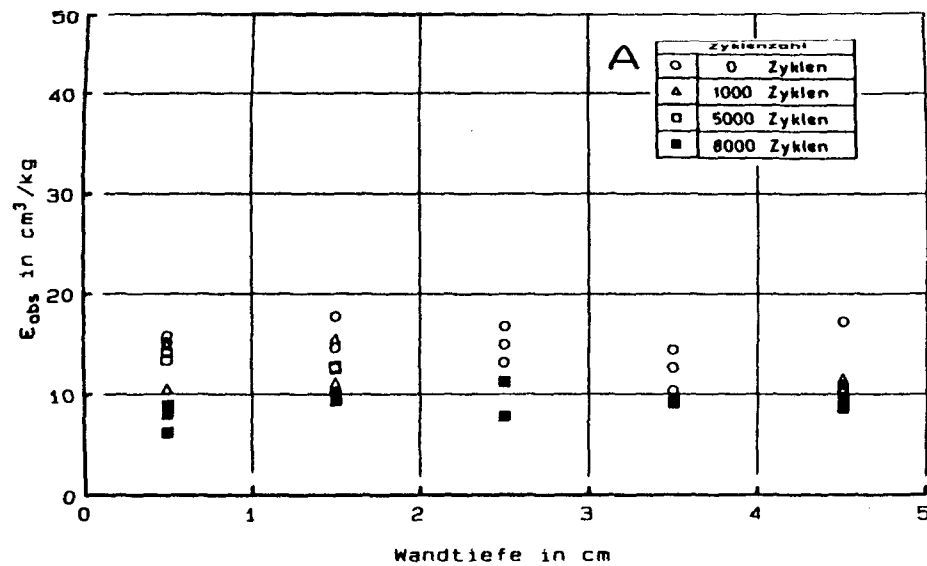


Bild D22

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe für den künstlich bewitterten Kleinkörper zugehörig zu Wand A getrennt nach der Anzahl der aufgetragenen Bewitterungszyklen.

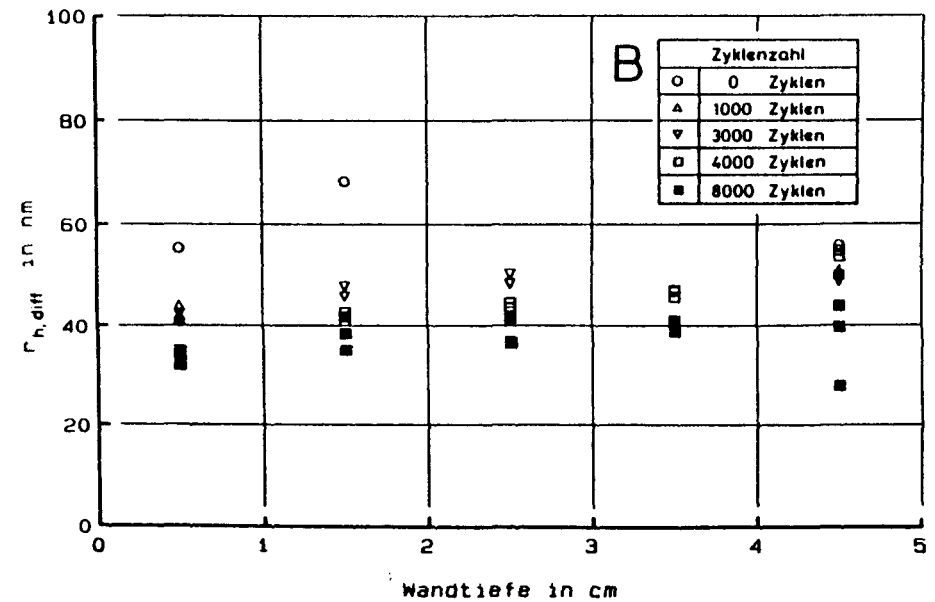
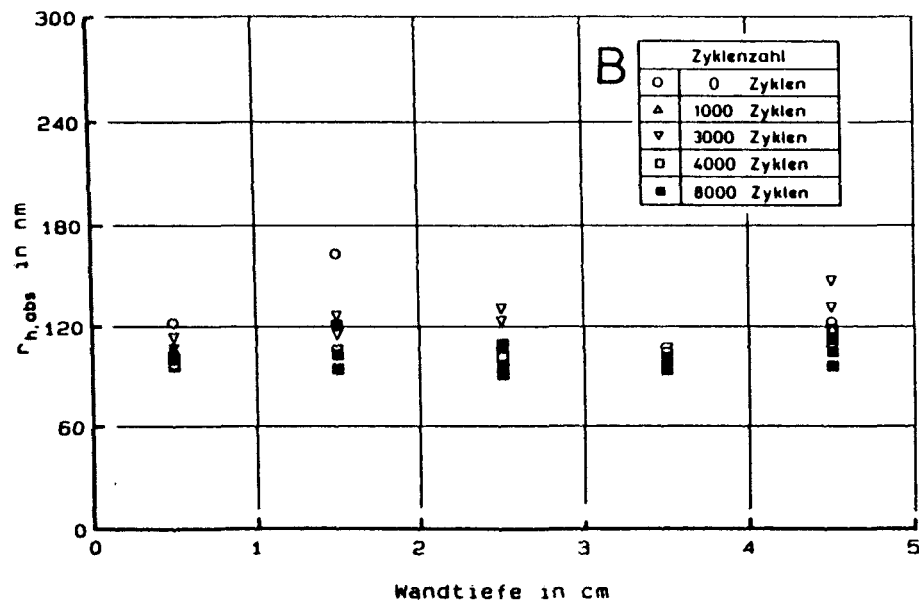
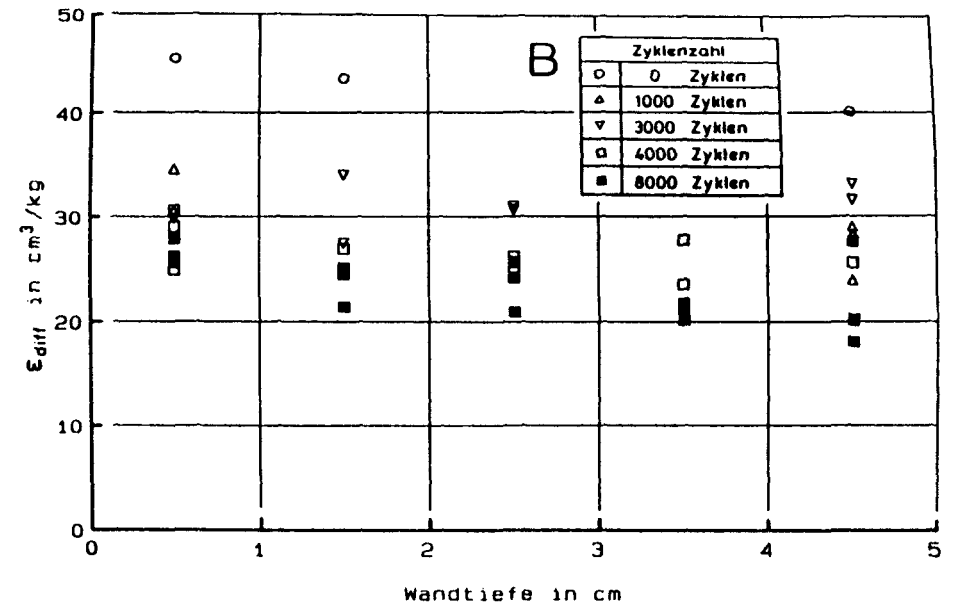
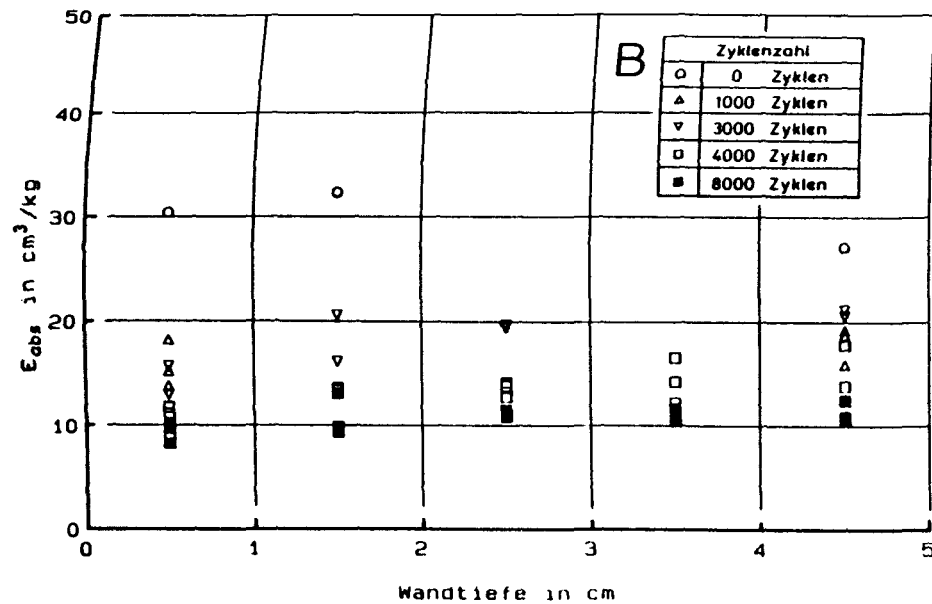


Bild D23

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe für den künstlich bewitterten Kleinkörper zugehörig zu Wand B getrennt nach der Anzahl der aufgetragenen Bewitterungszyklen.

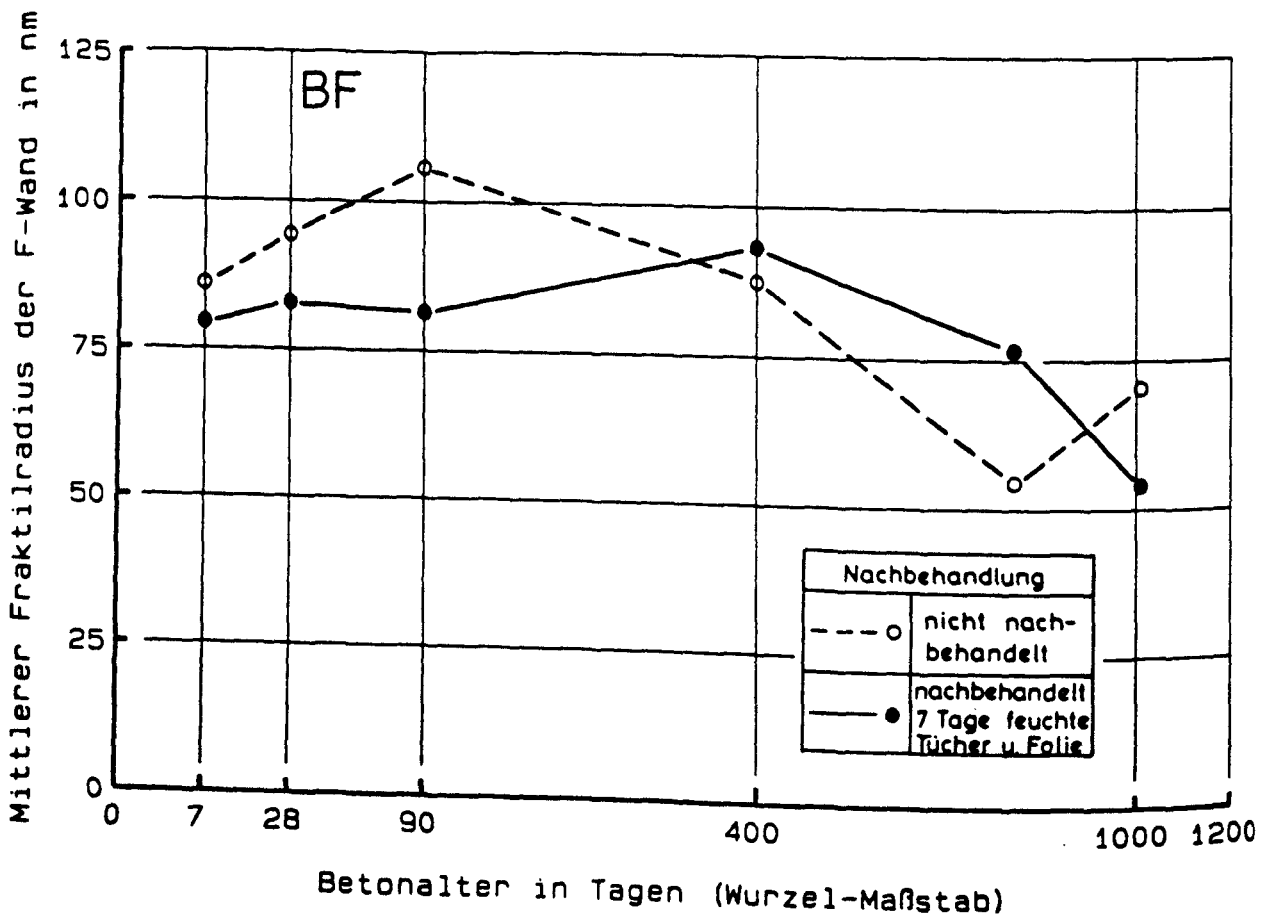
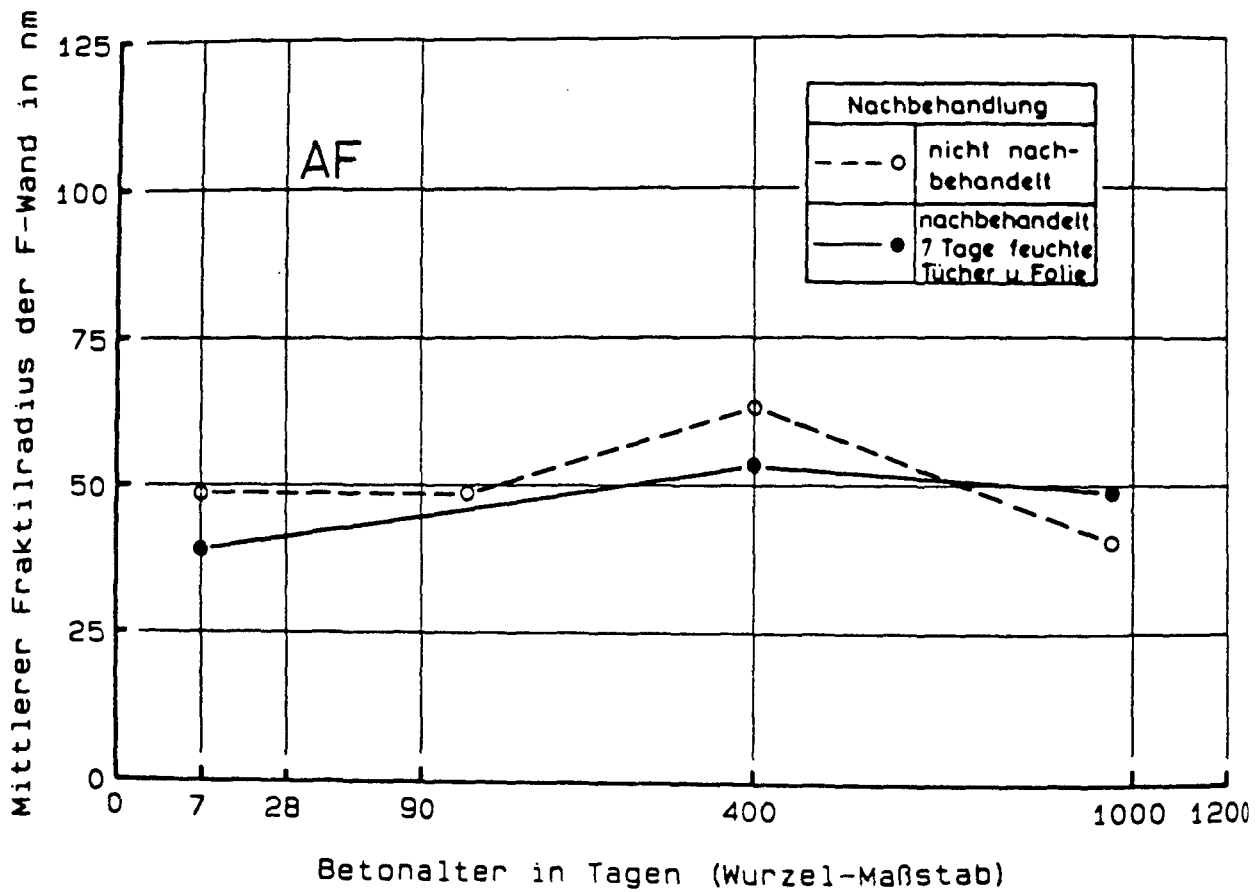


Bild D24

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius r_g für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wände AF (obere Bildhälfte) und BF (untere Bildhälfte) in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

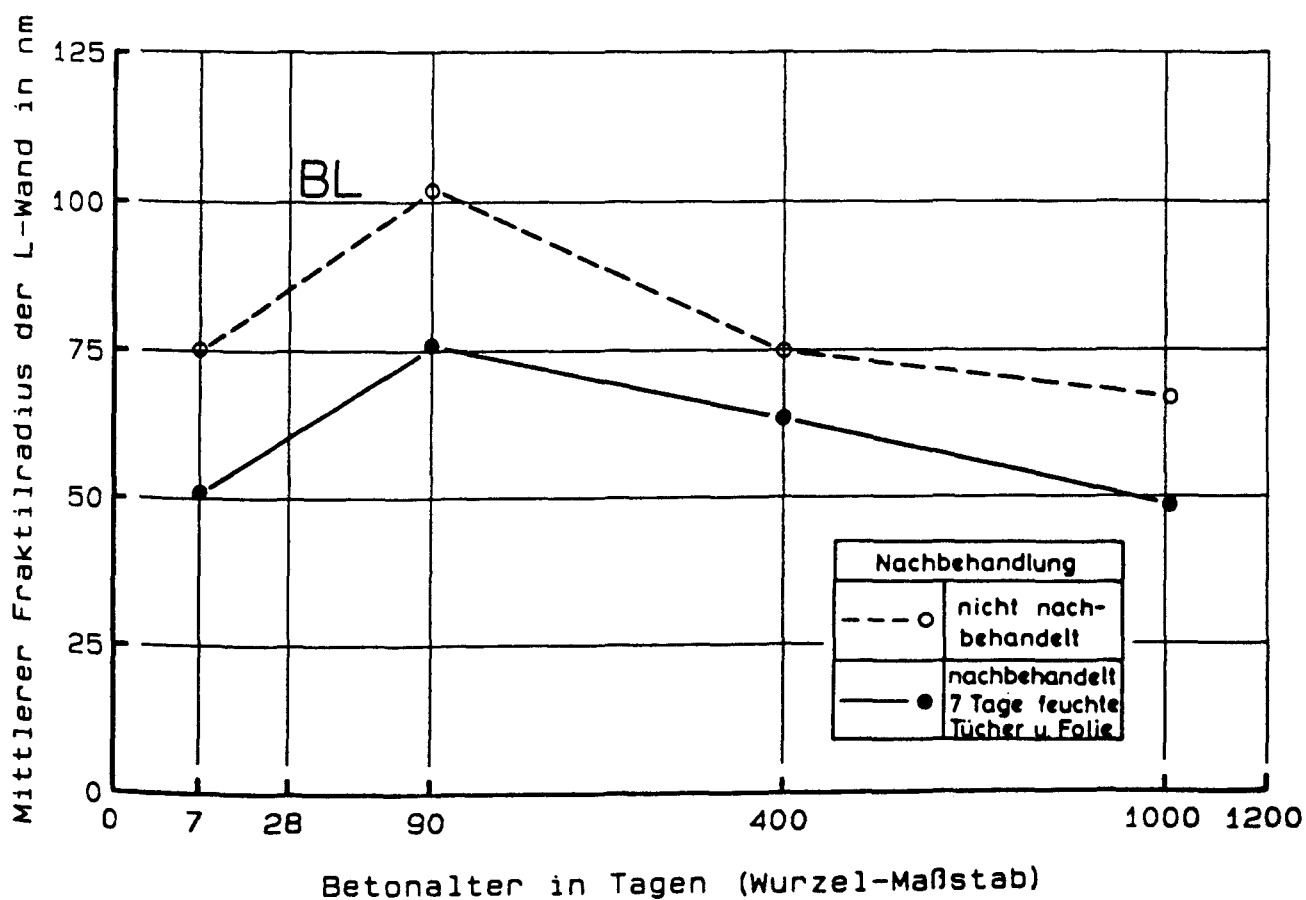
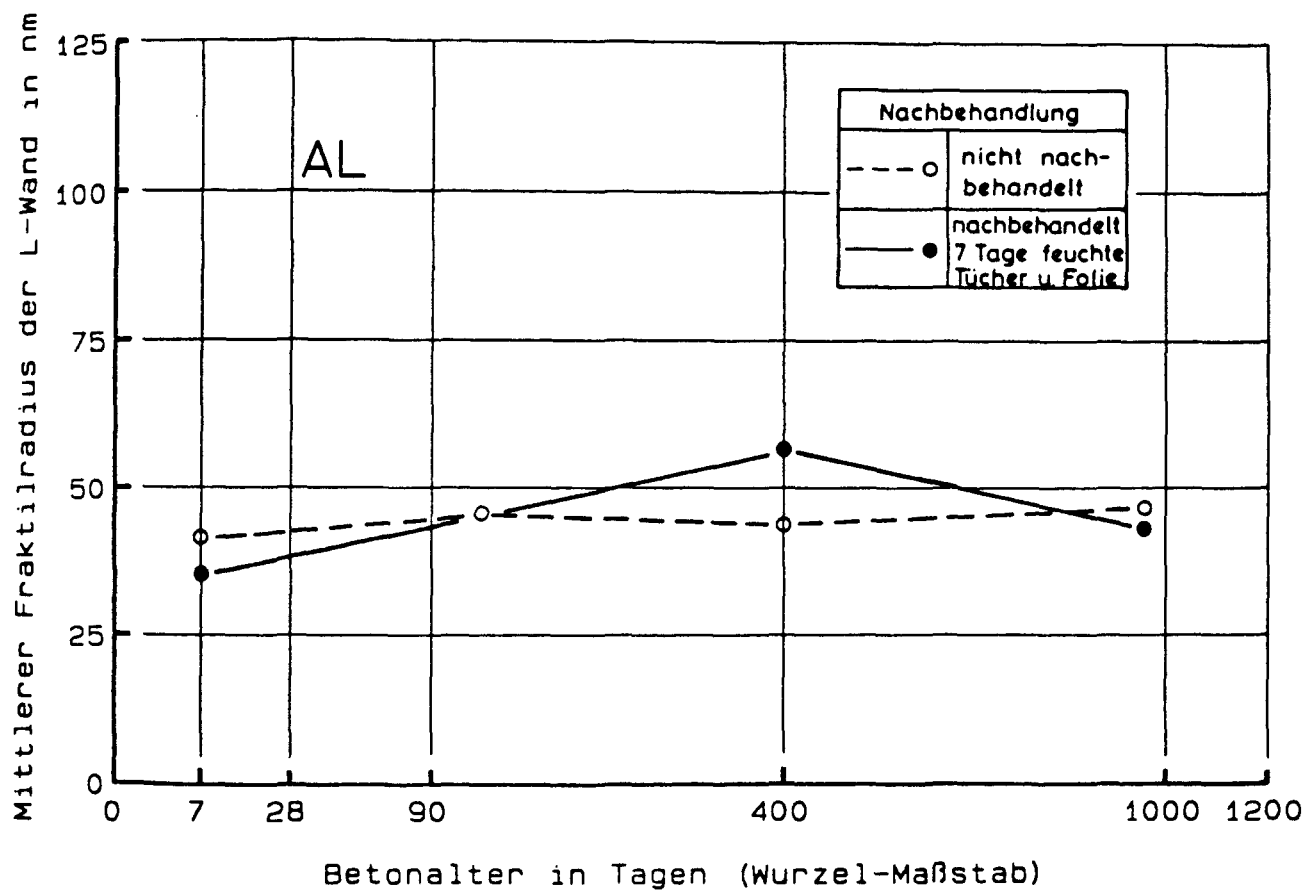


Bild D25

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktilradius r_g für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wände AL (obere Bildhälfte) und BL (untere Bildhälfte) in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

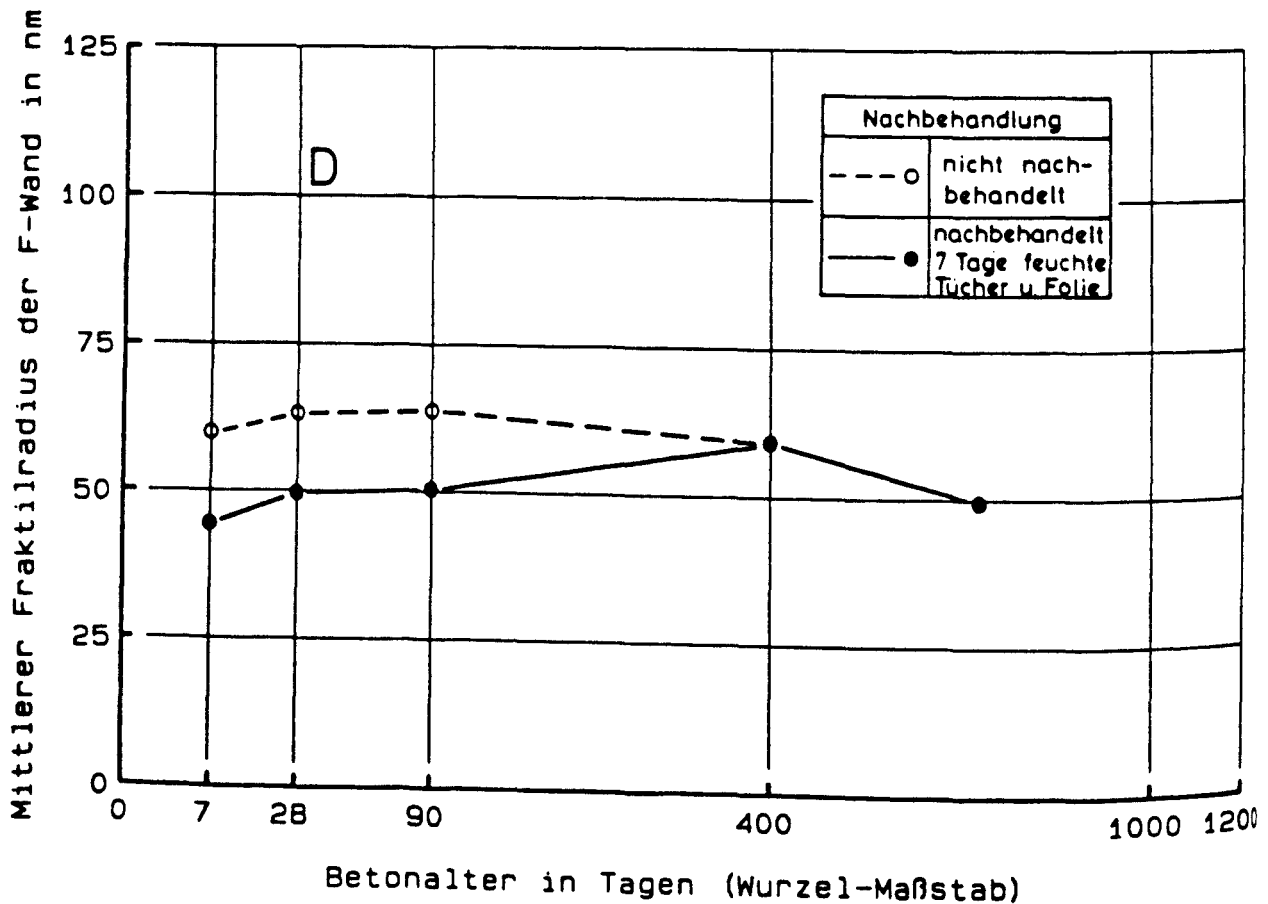
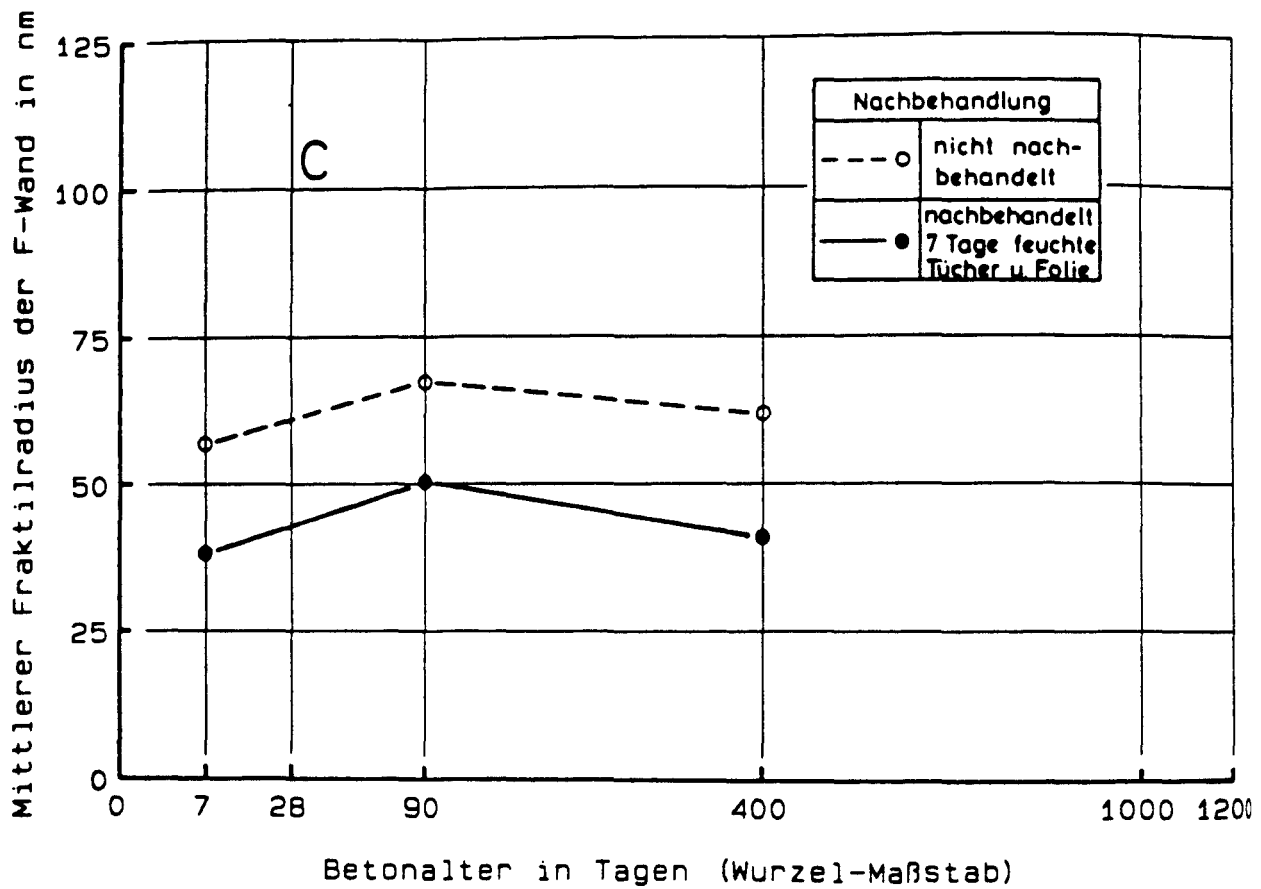


Bild D26

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius r_g für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wände C (obere Bildhälfte) und D (untere Bildhälfte) in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

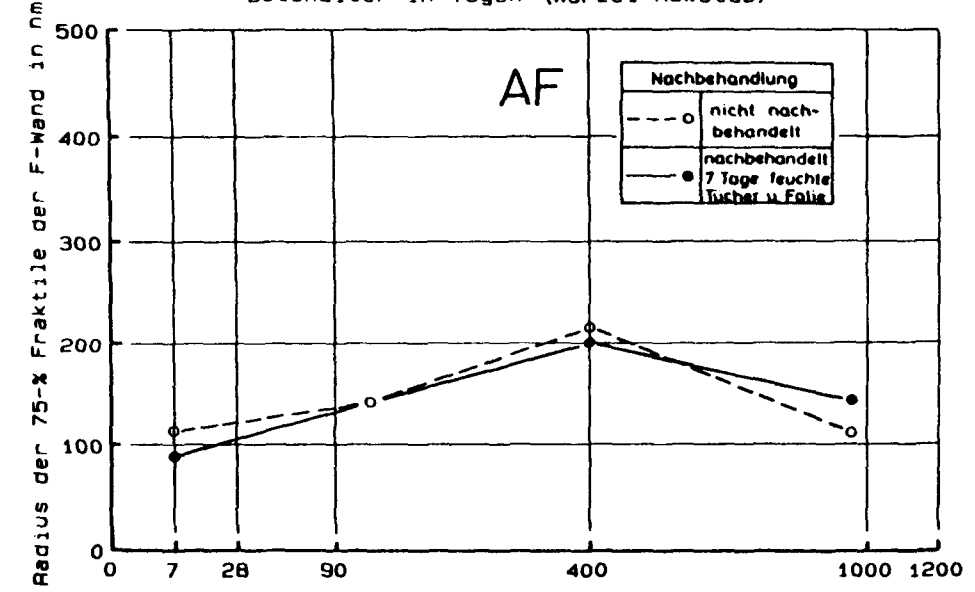
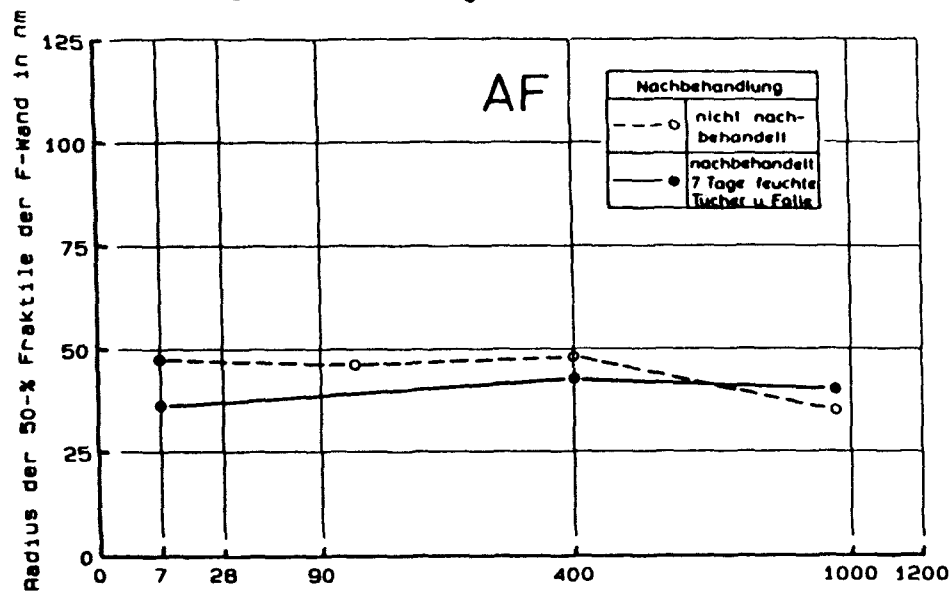
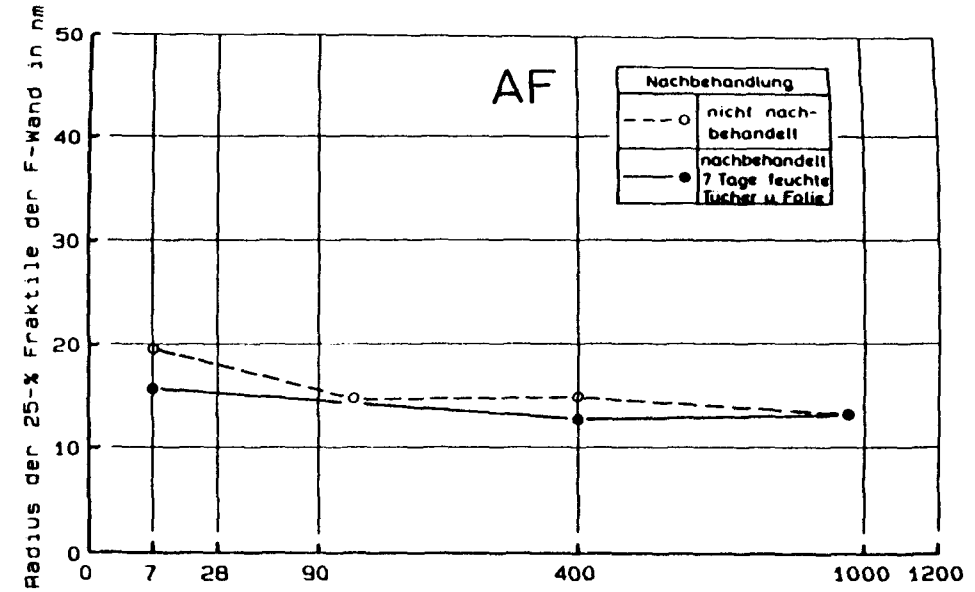
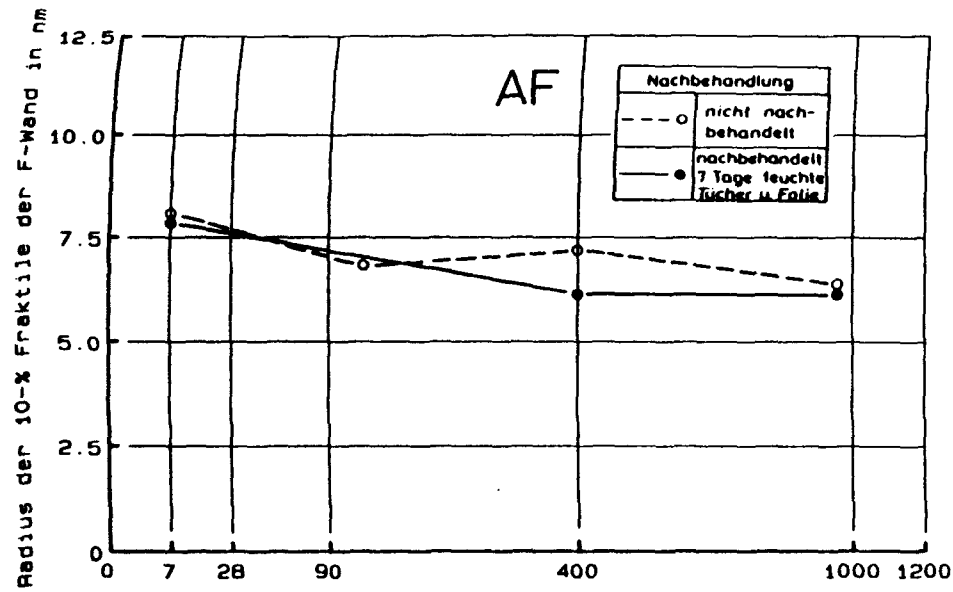


Bild D27

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktilradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand AF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

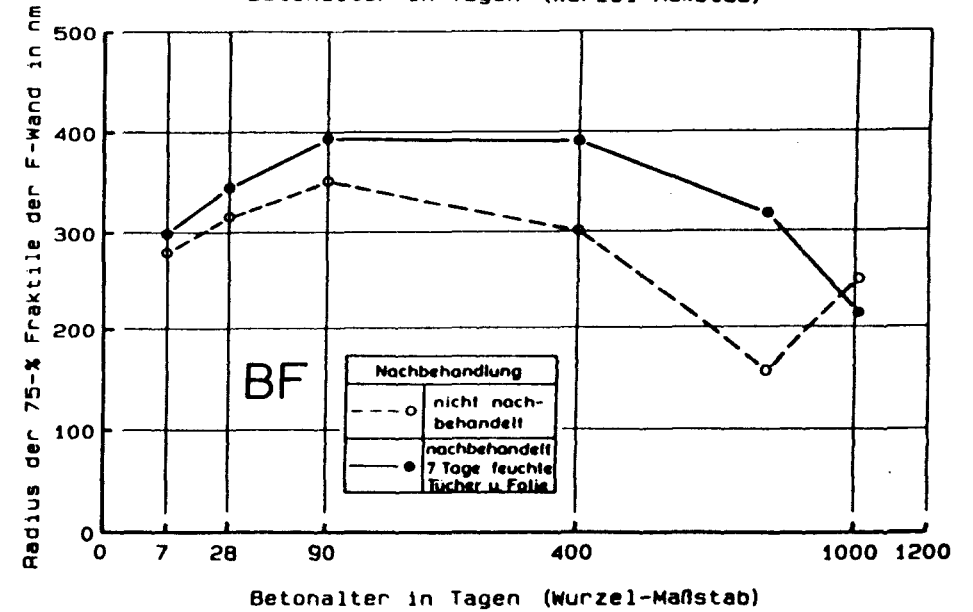
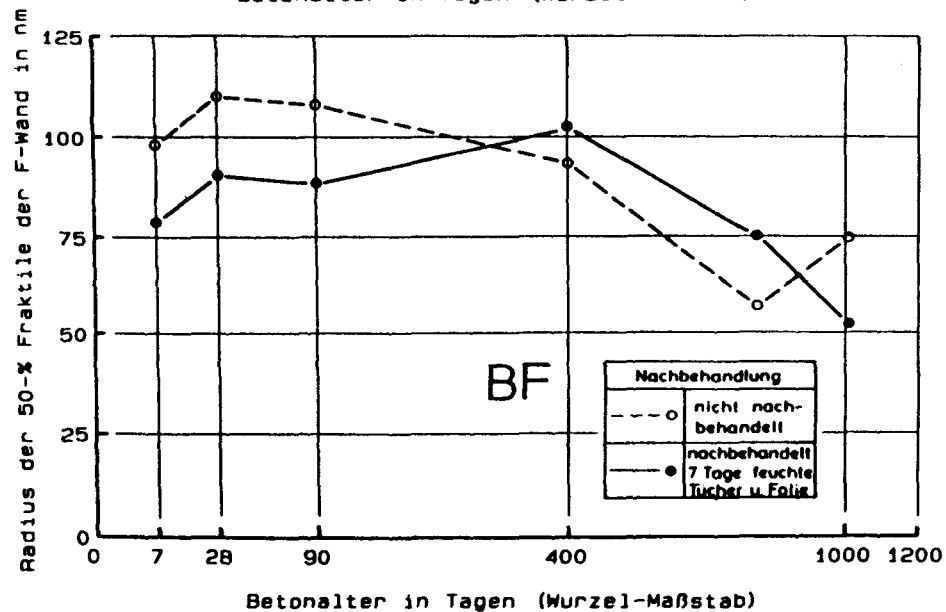
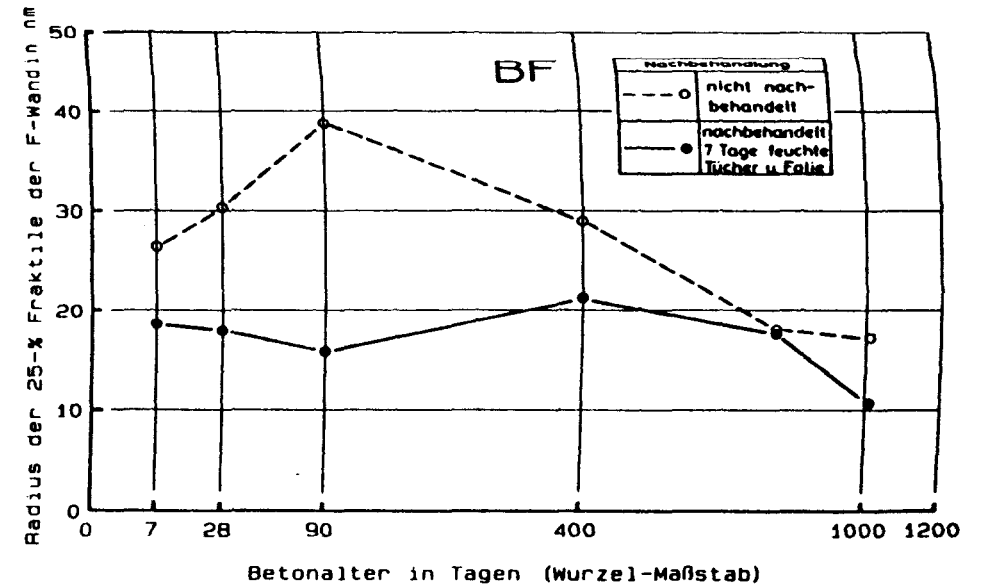
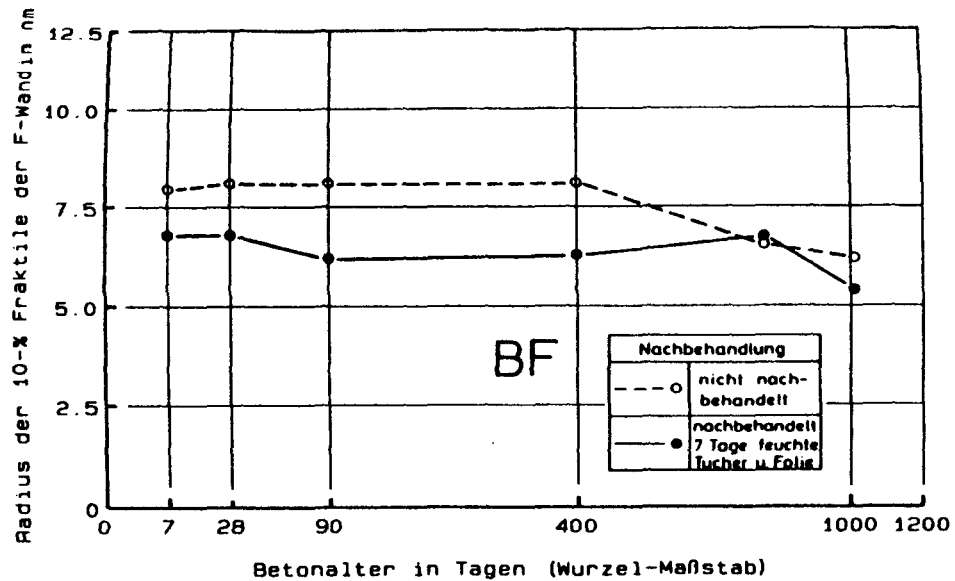


Bild D28

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktilradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand BF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

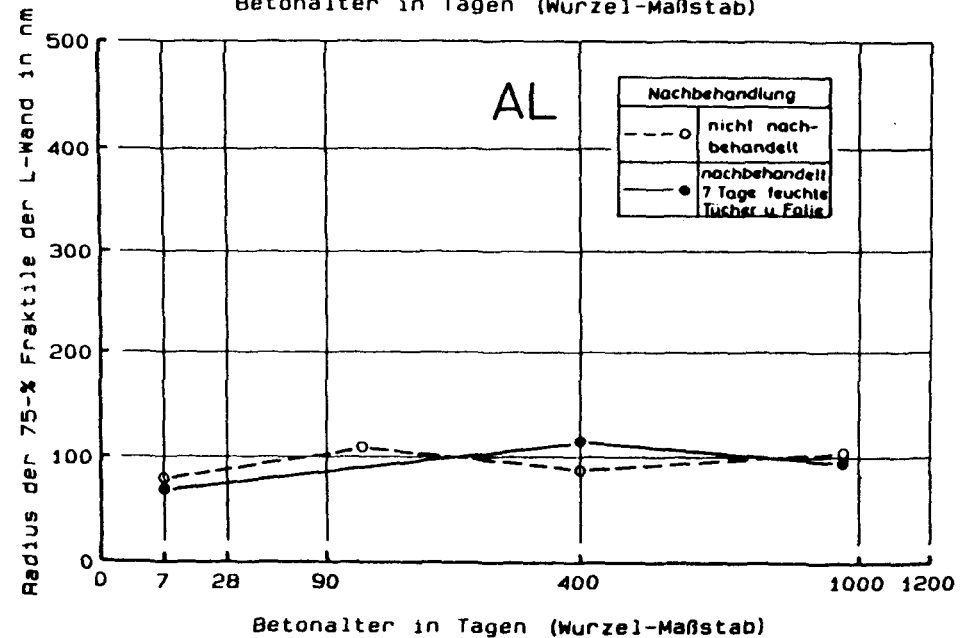
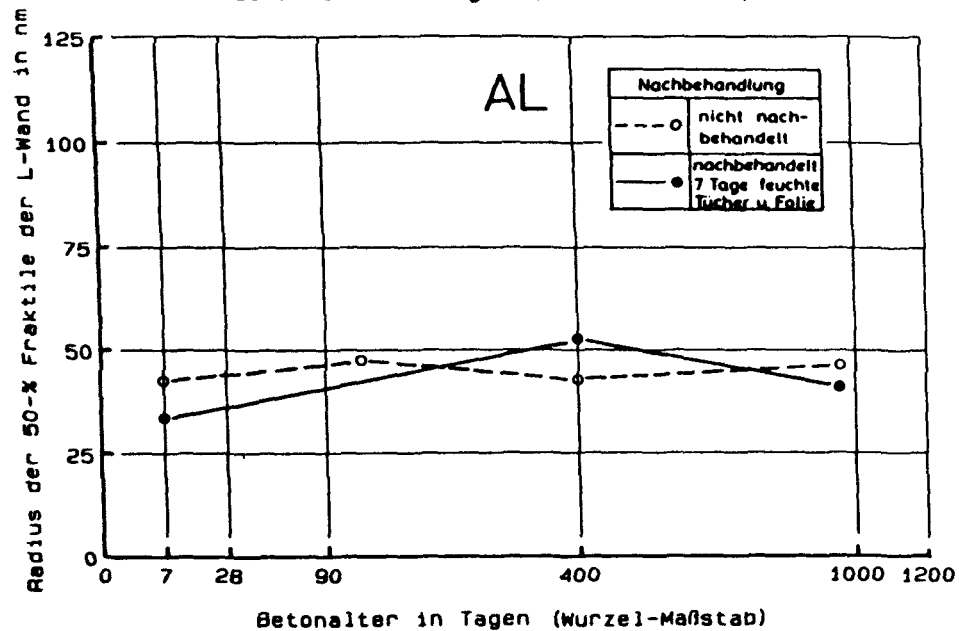
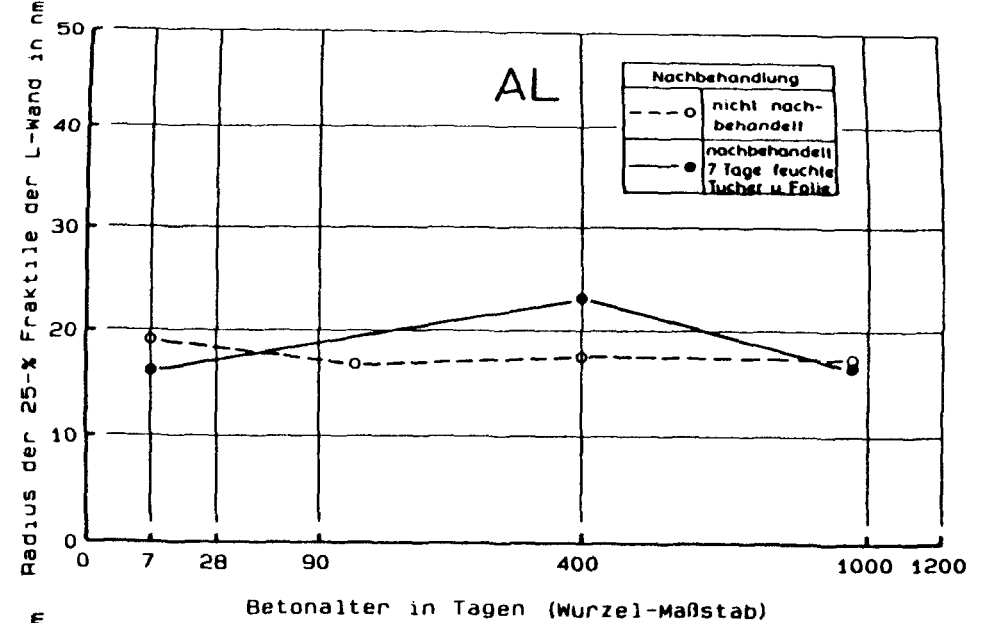
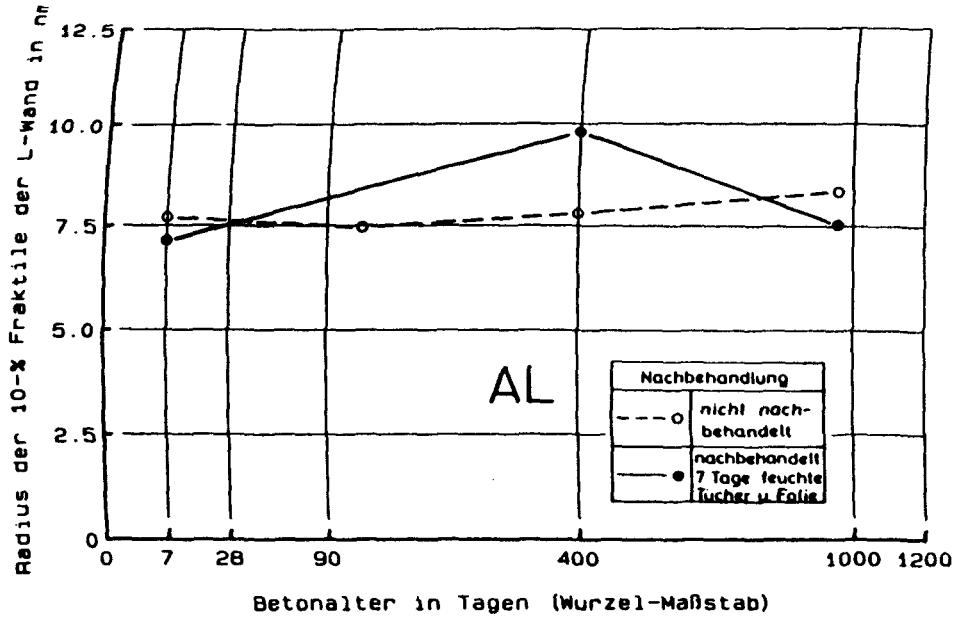


Bild D29

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktilradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand AL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

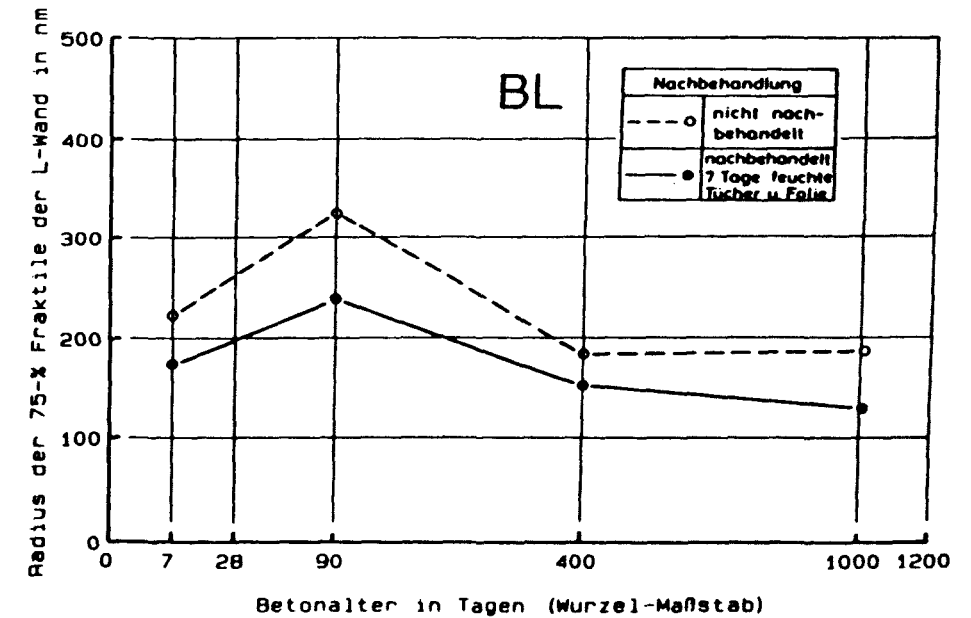
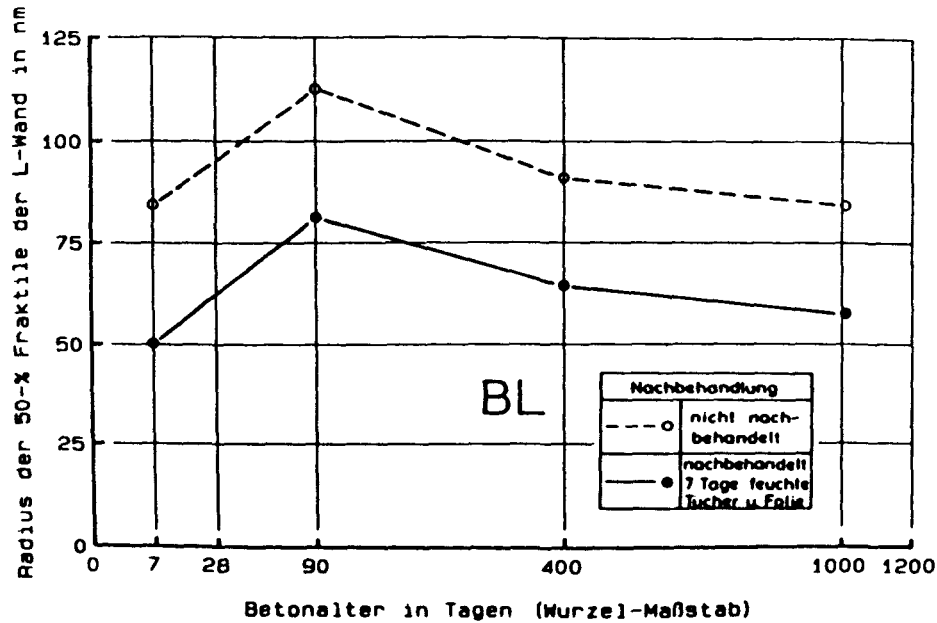
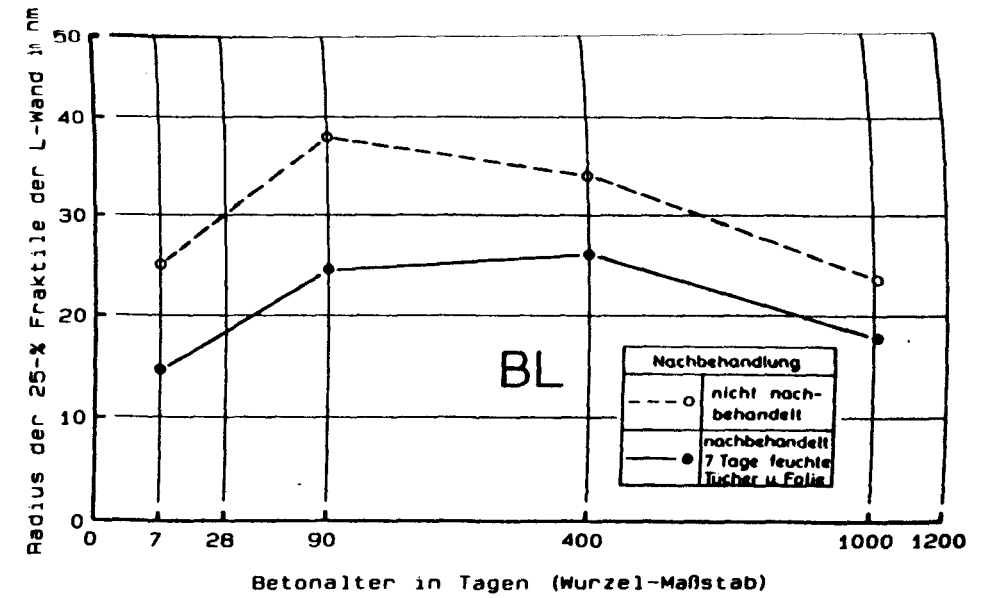
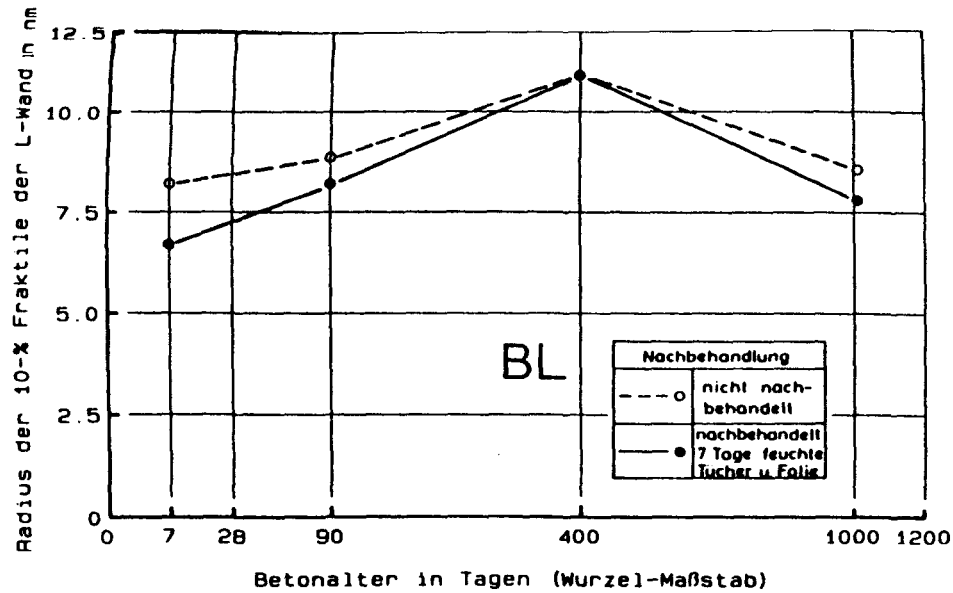


Bild D30

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktilradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand BL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

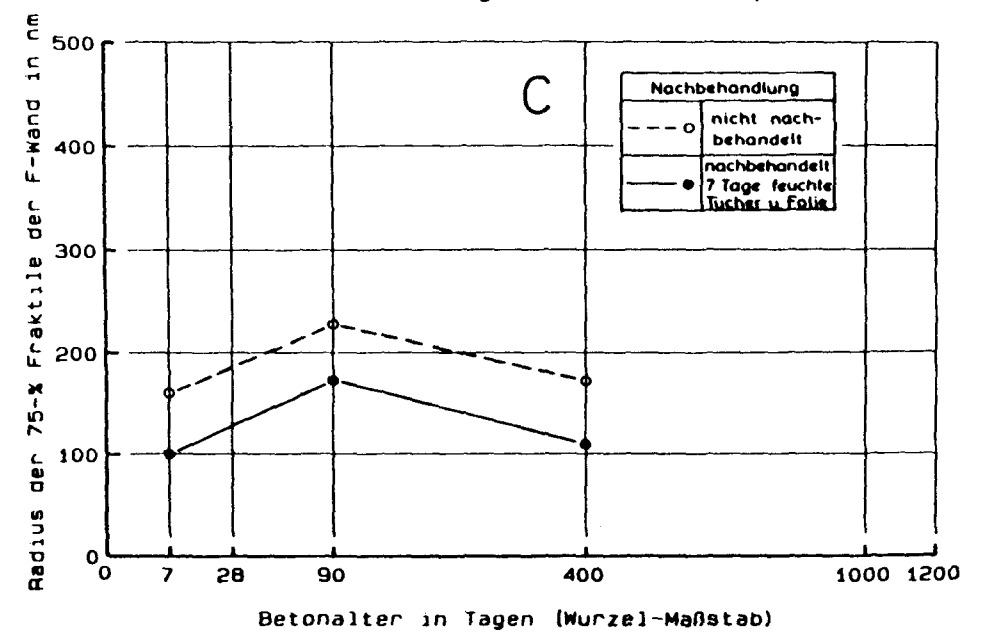
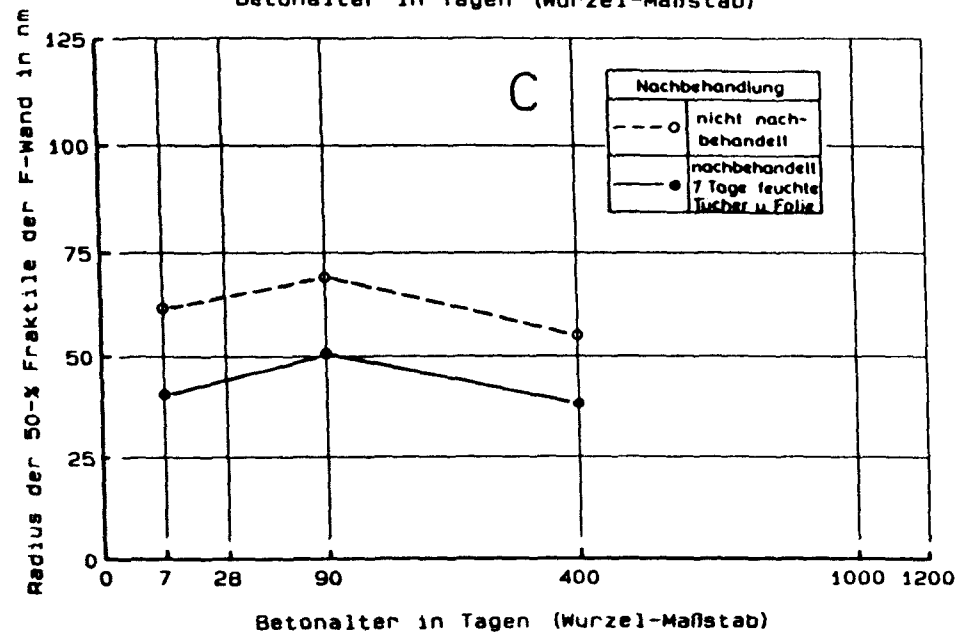
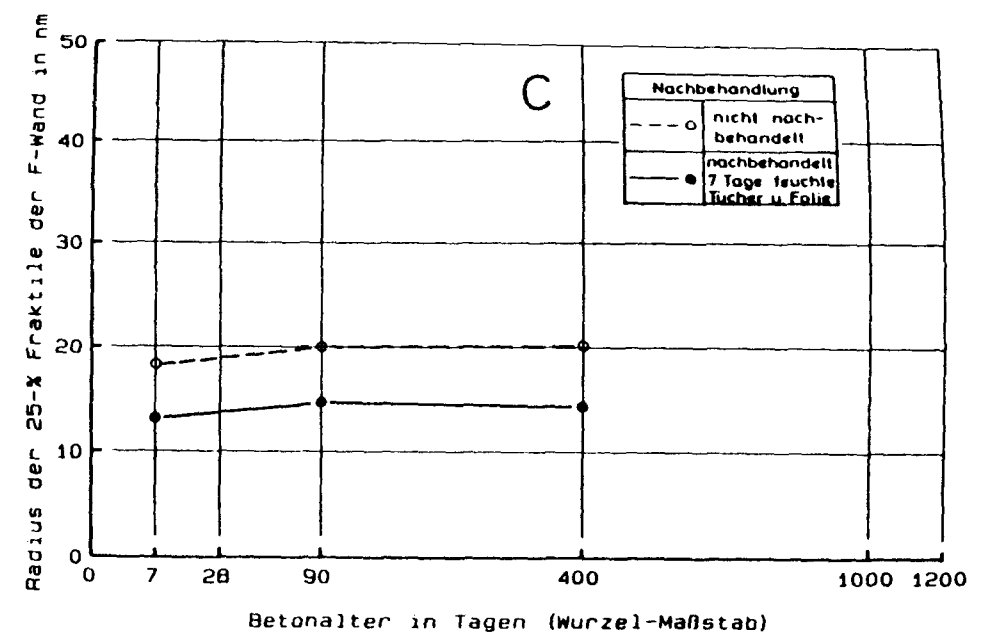
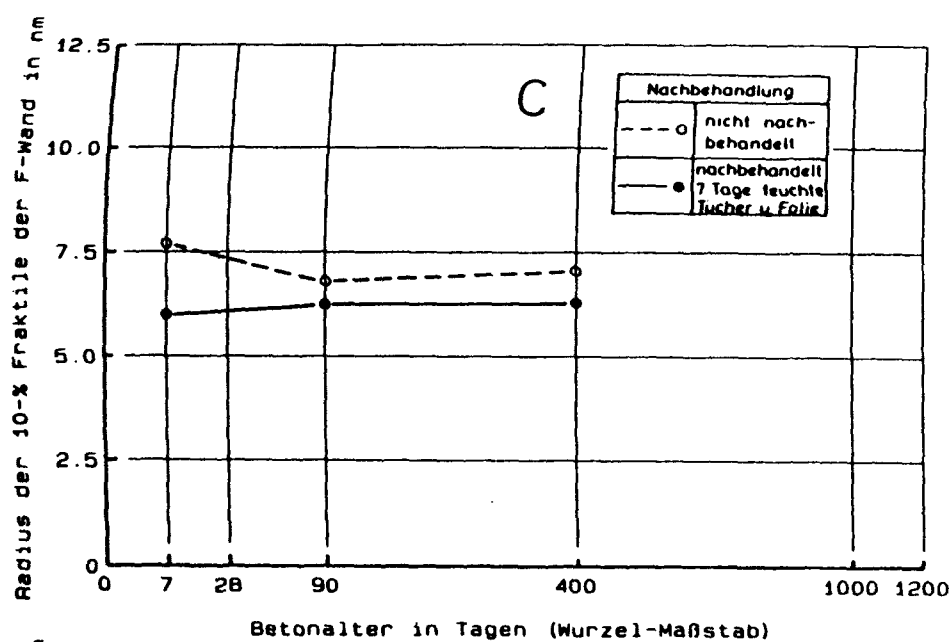


Bild D31

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktillradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand C in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

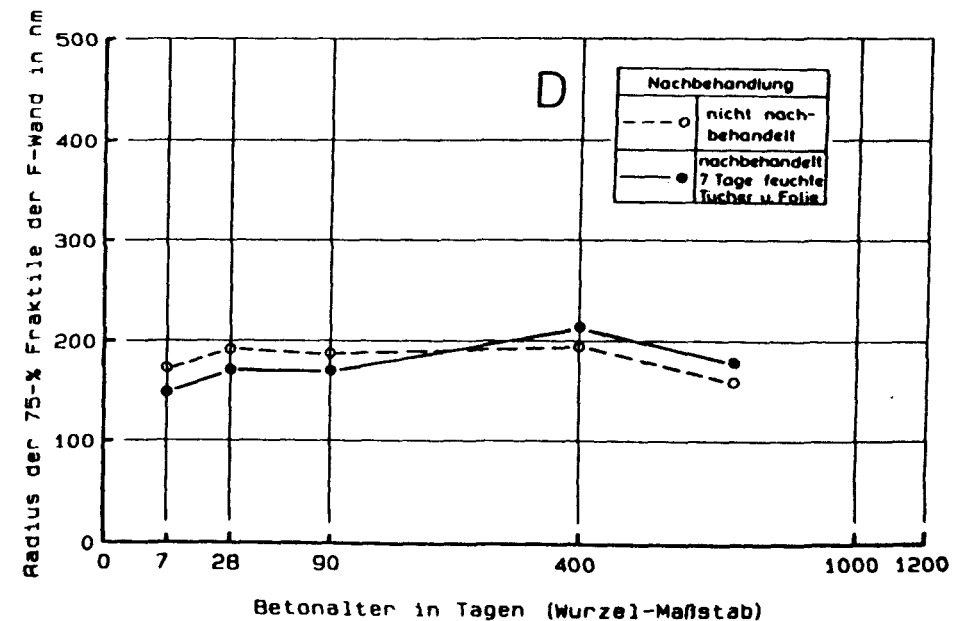
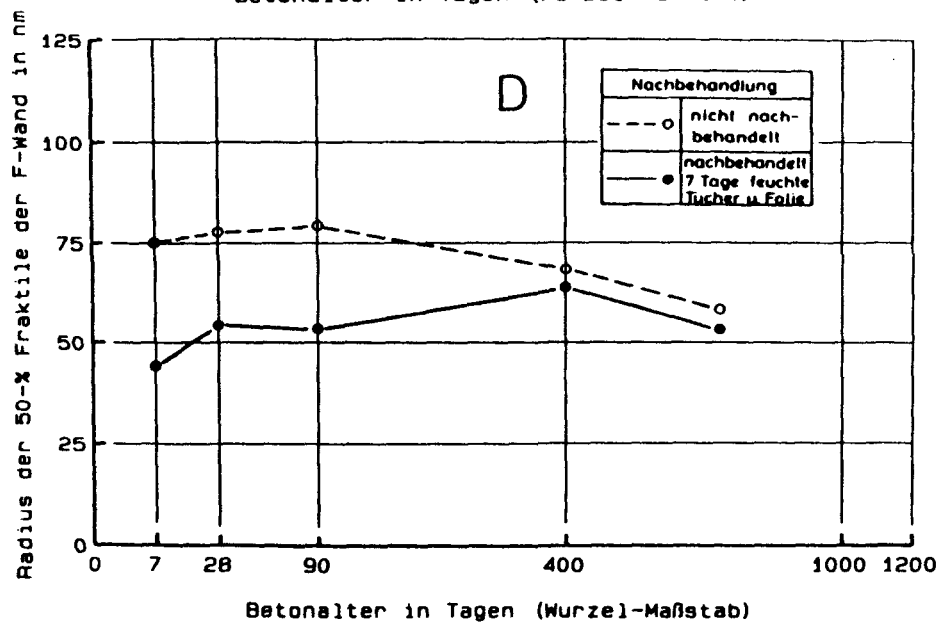
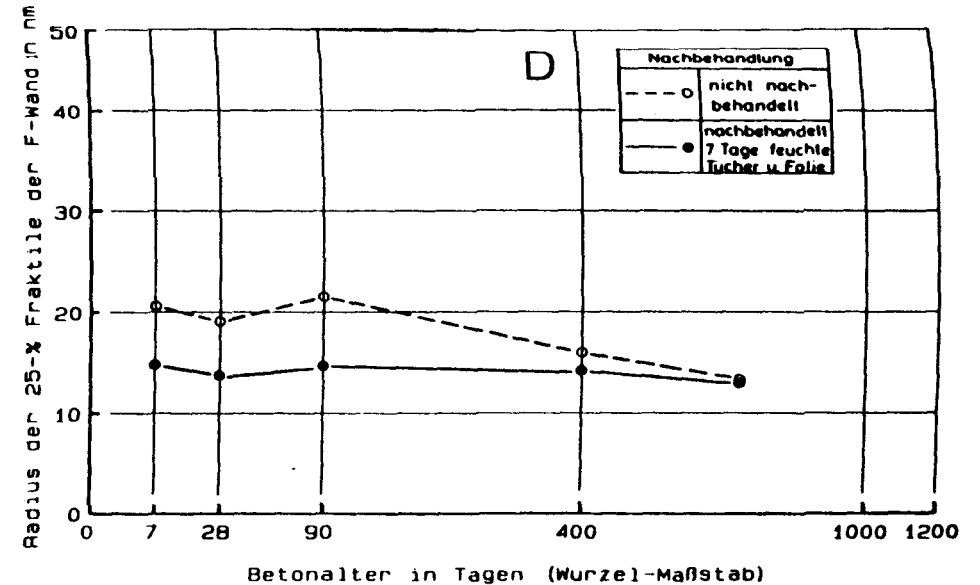
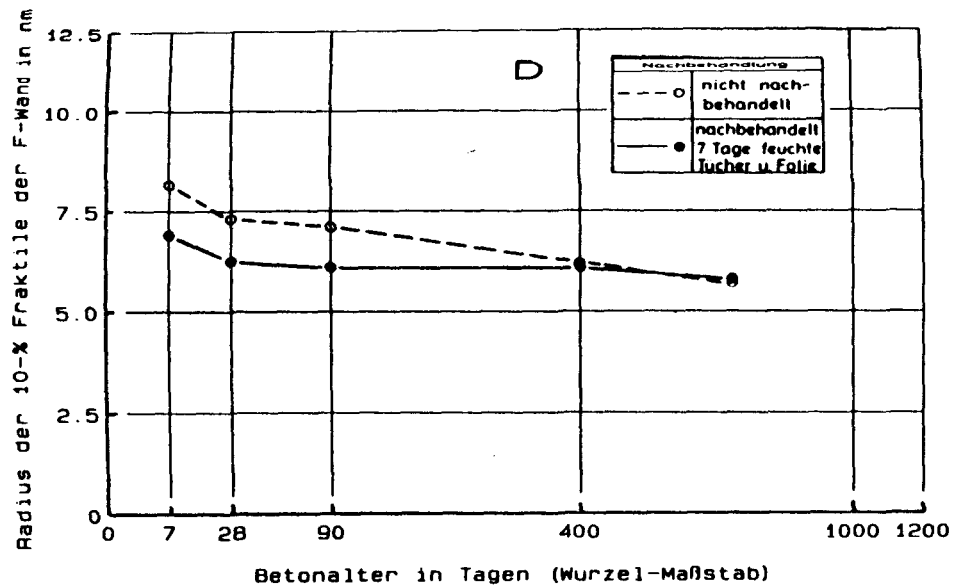


Bild D32

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktilradien für die Wandtiefe 0 - 10 mm der Wand D in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

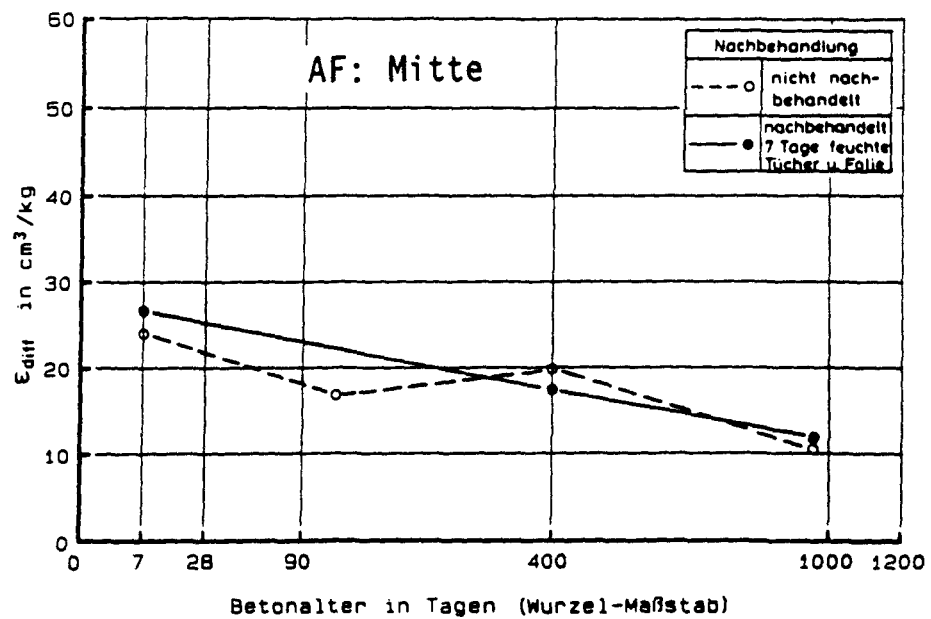
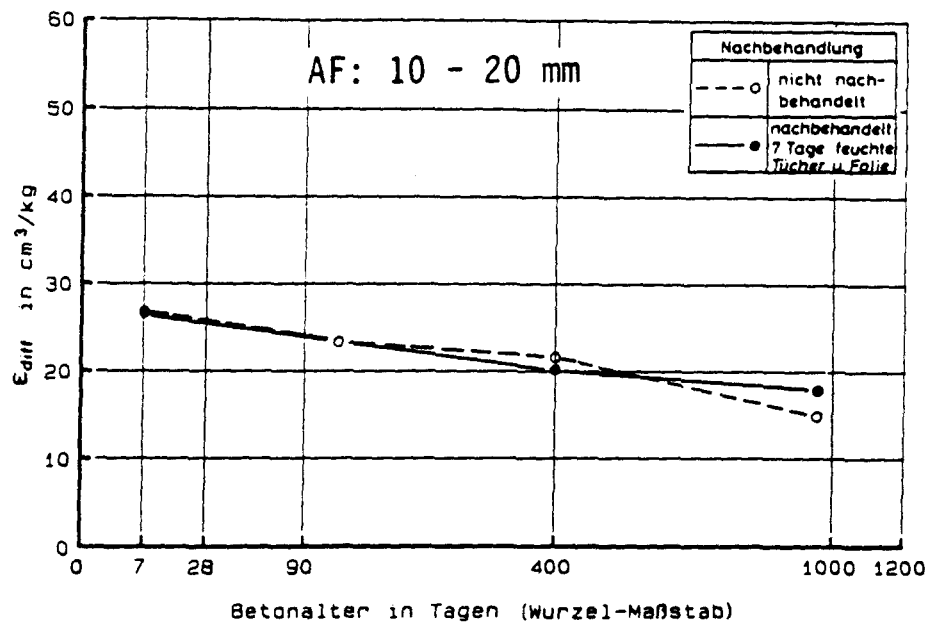
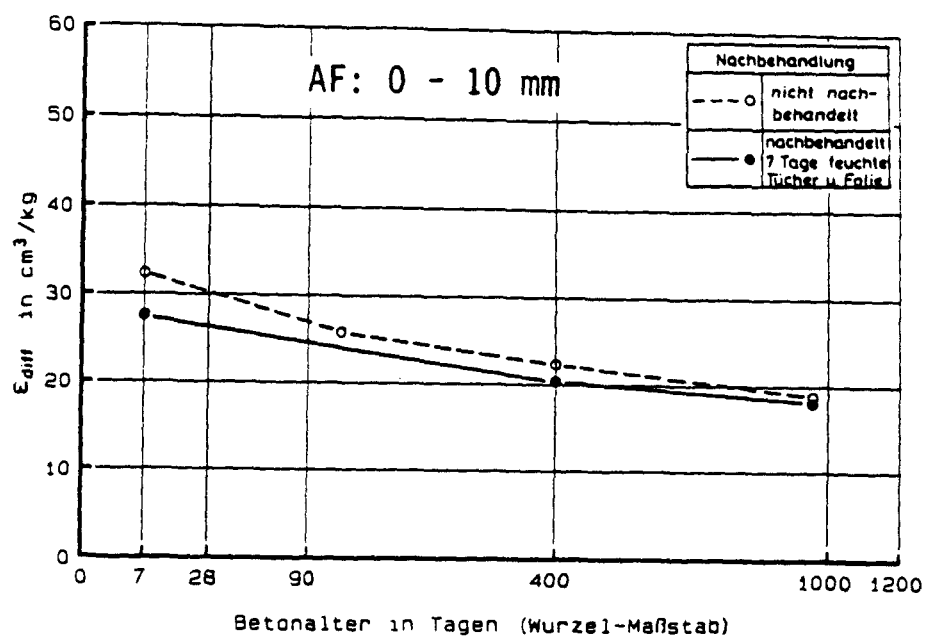


Bild D33

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

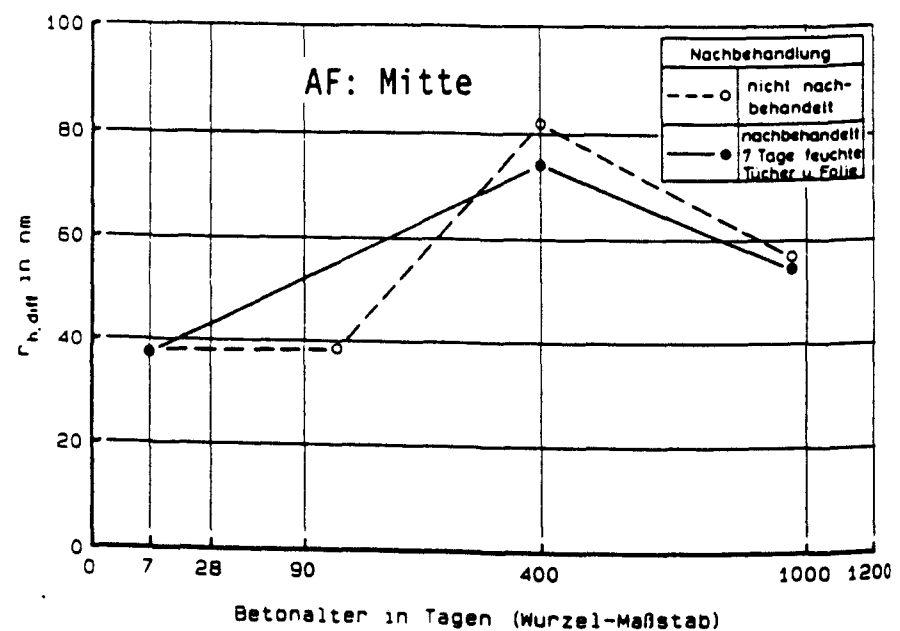
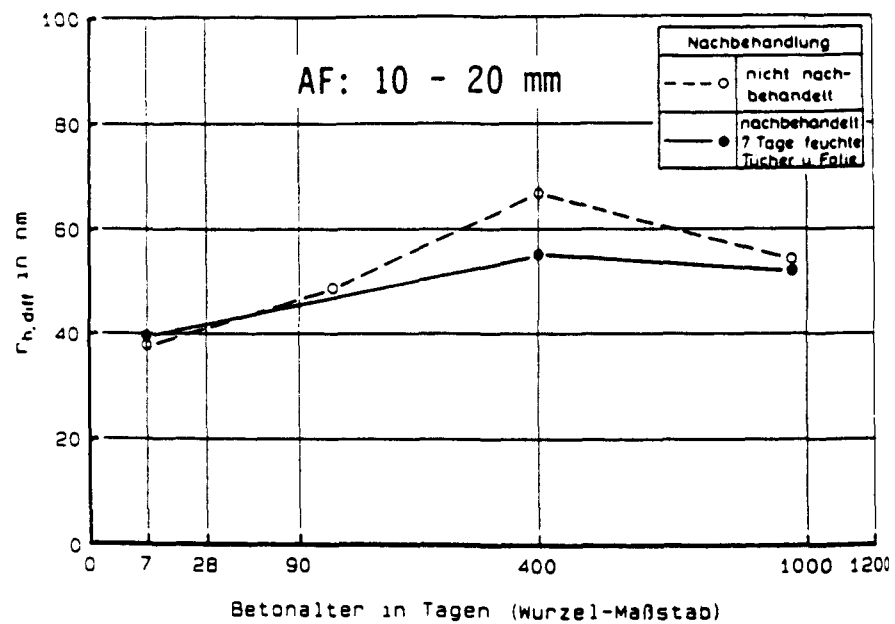
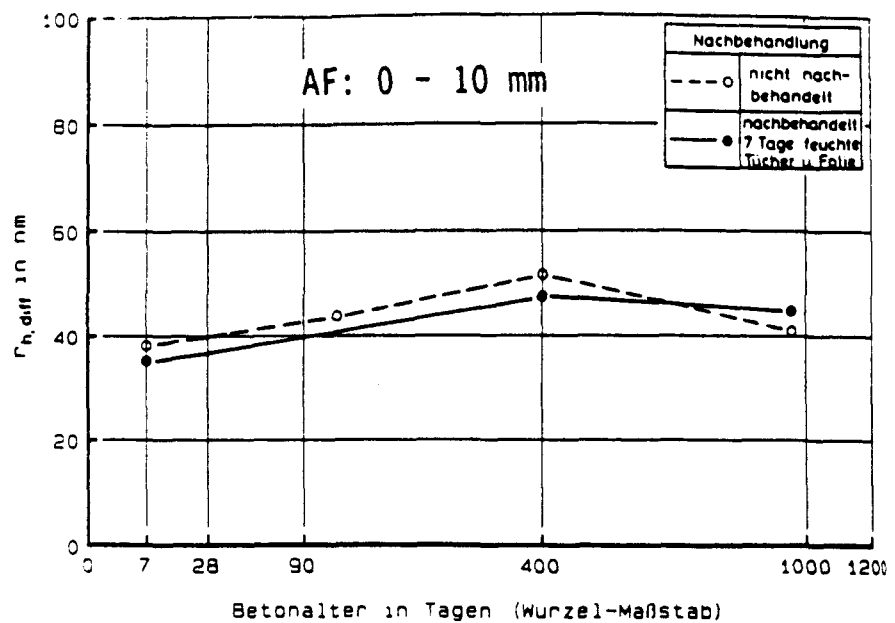


Bild D34

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radiuses $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

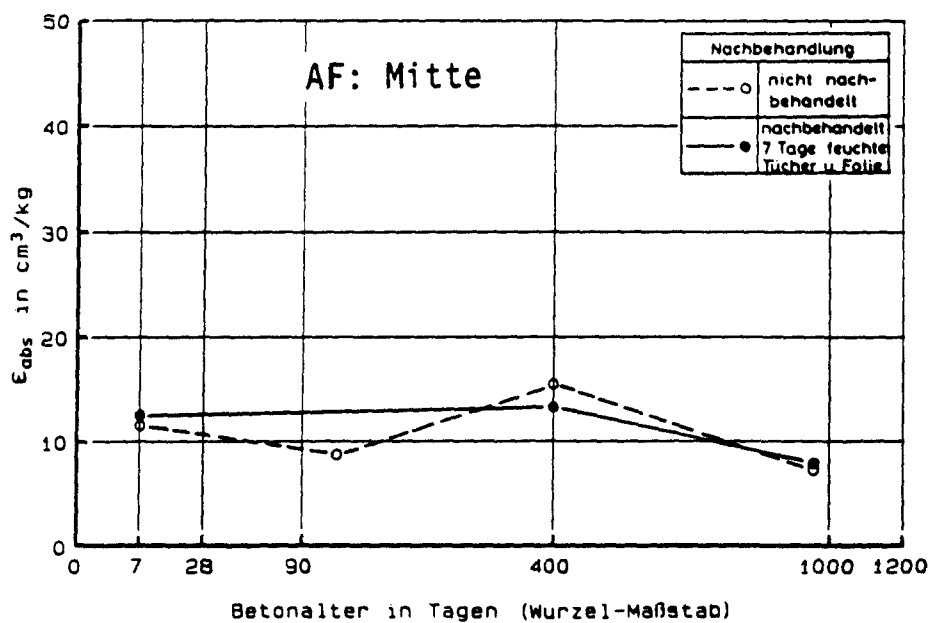
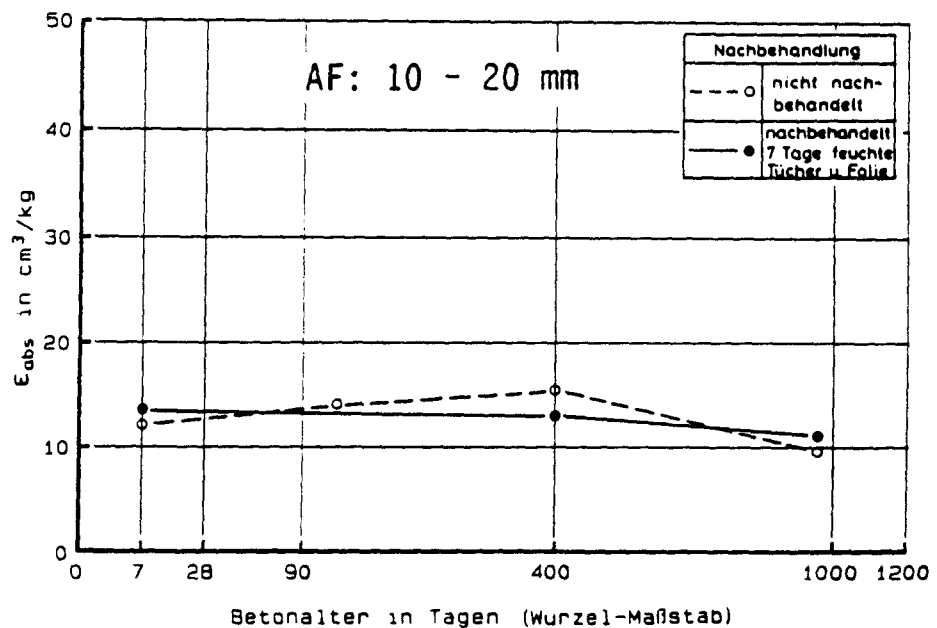
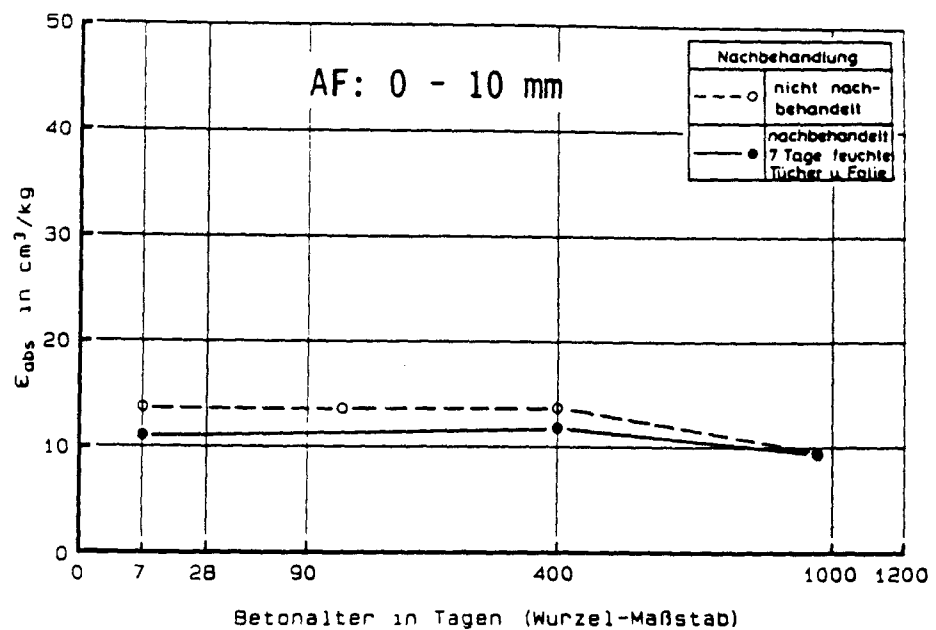


Bild D35

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

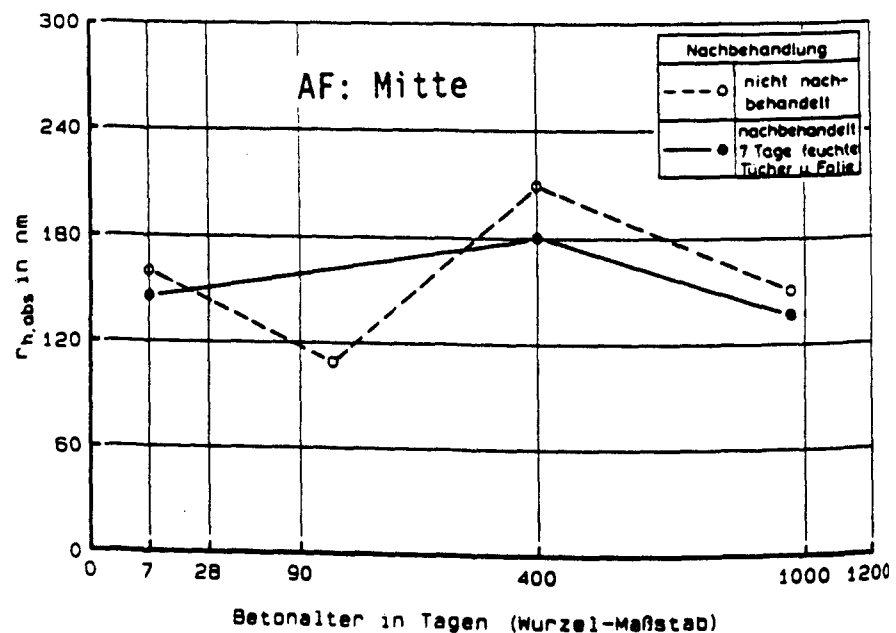
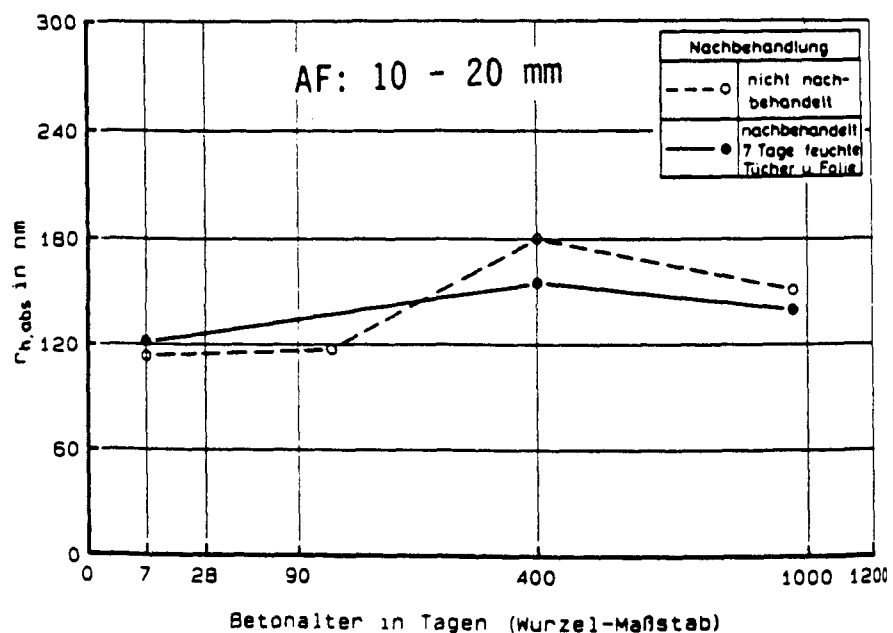
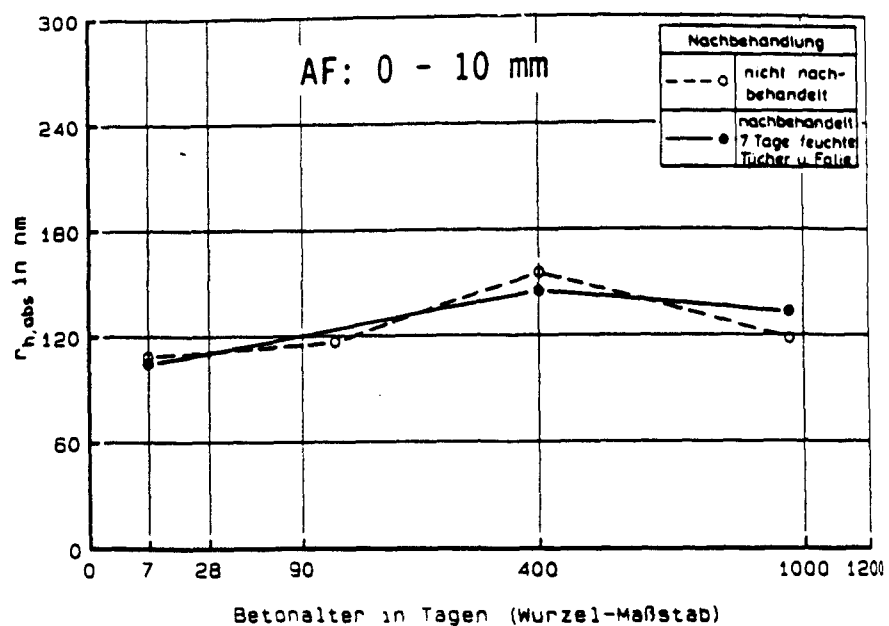


Bild D36

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

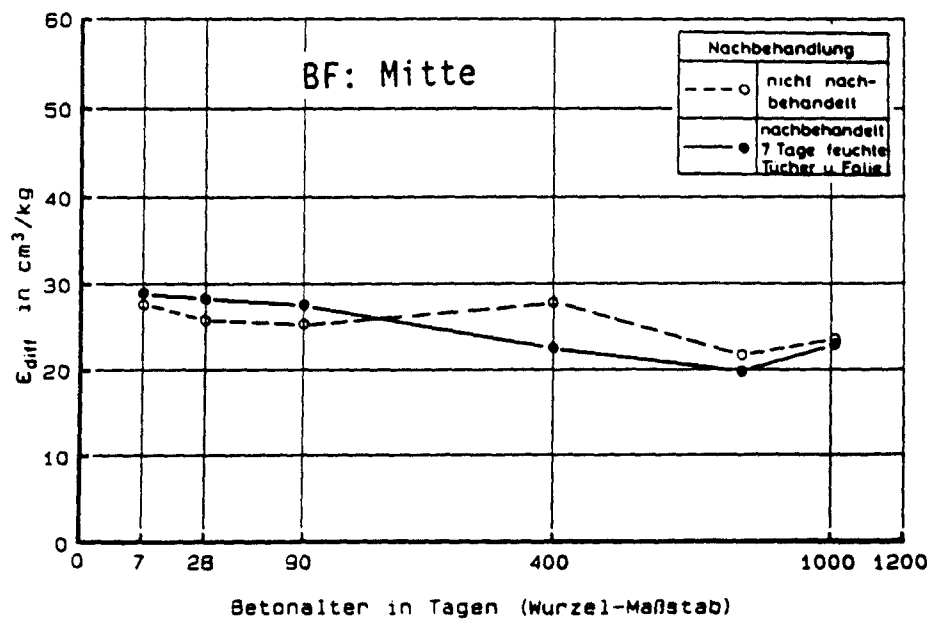
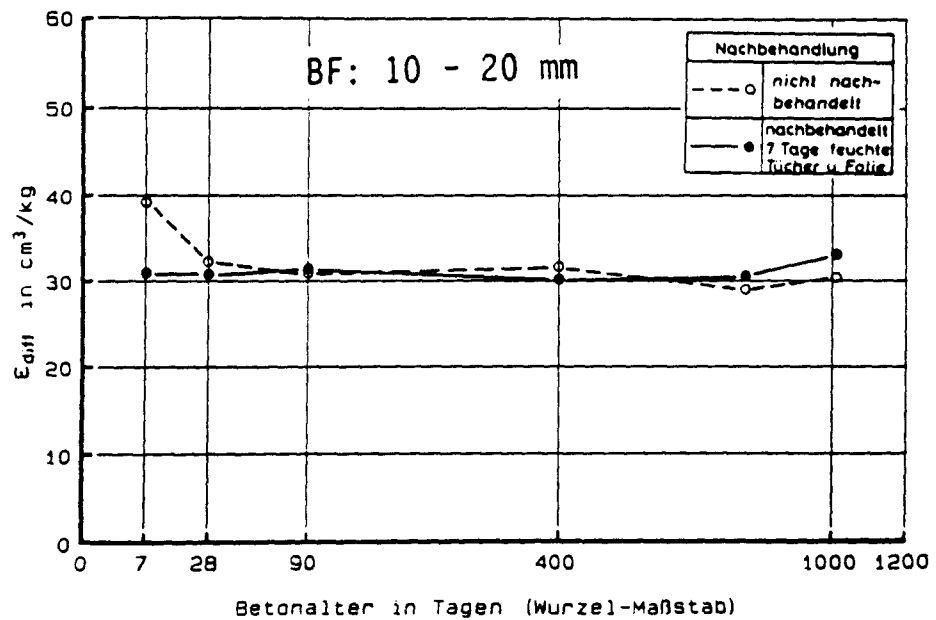
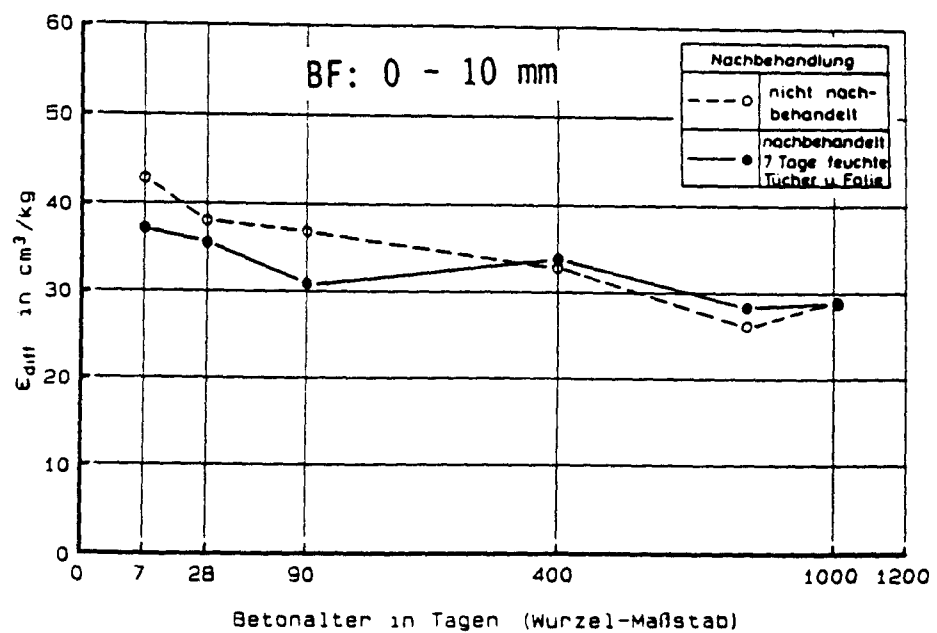


Bild D37

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

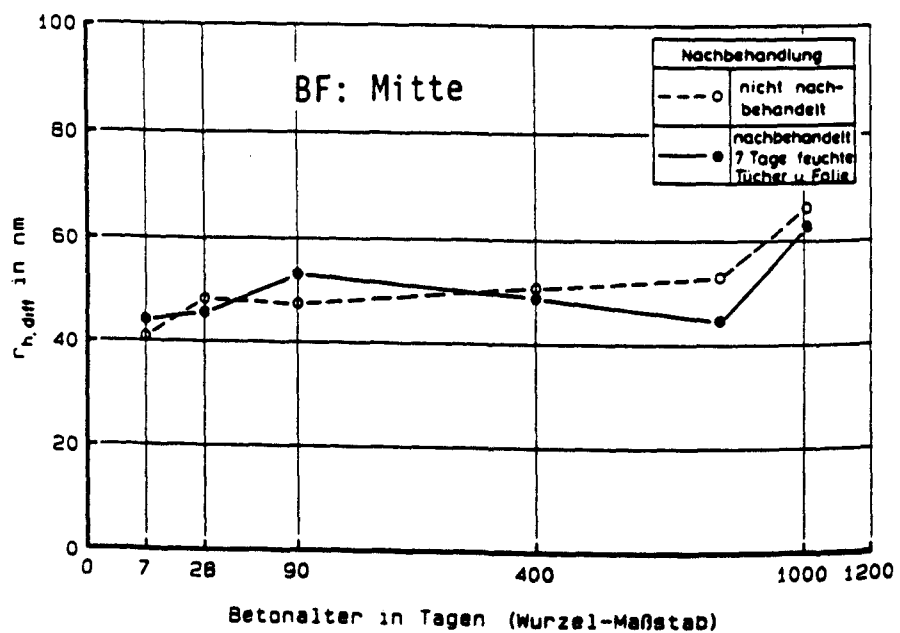
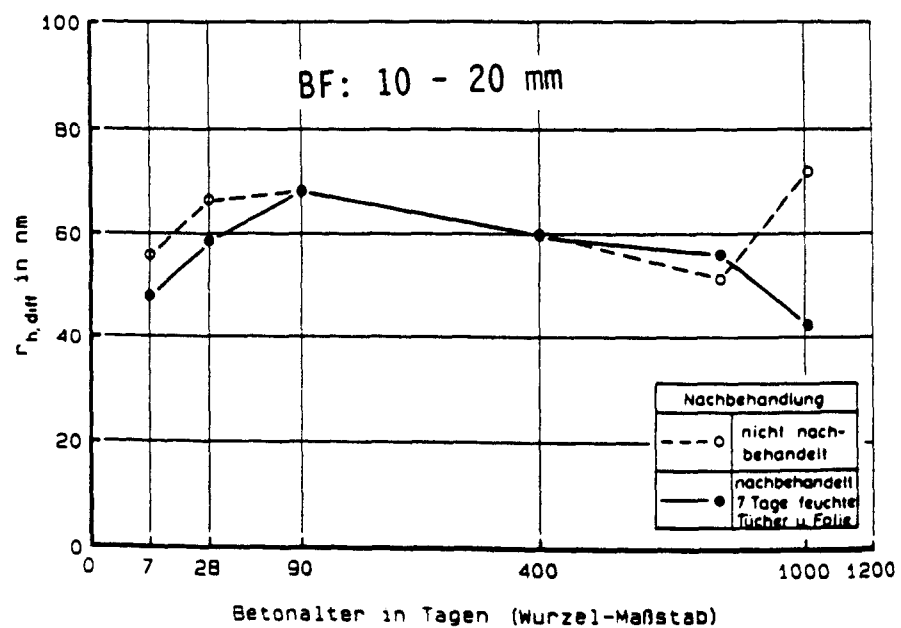
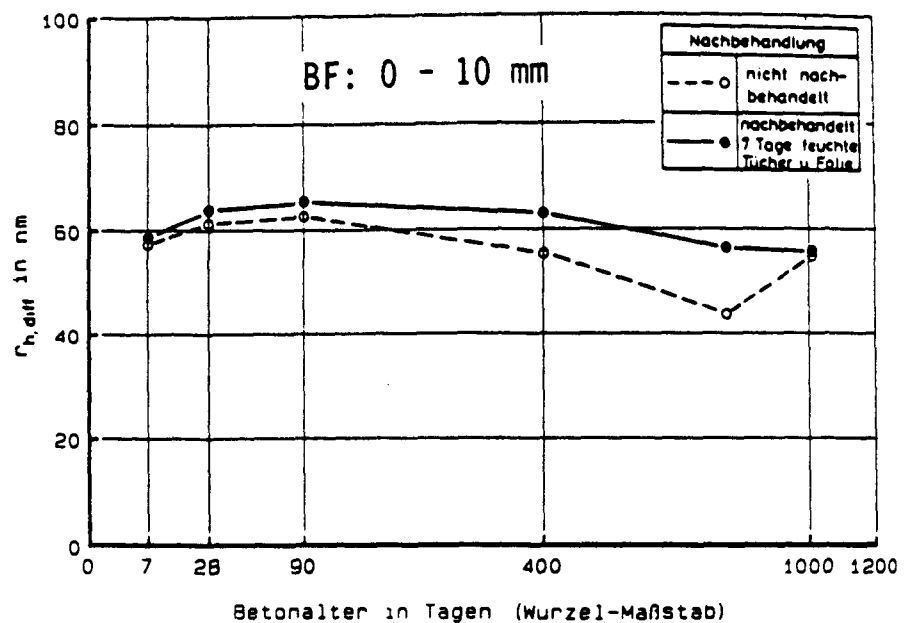


Bild D38

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

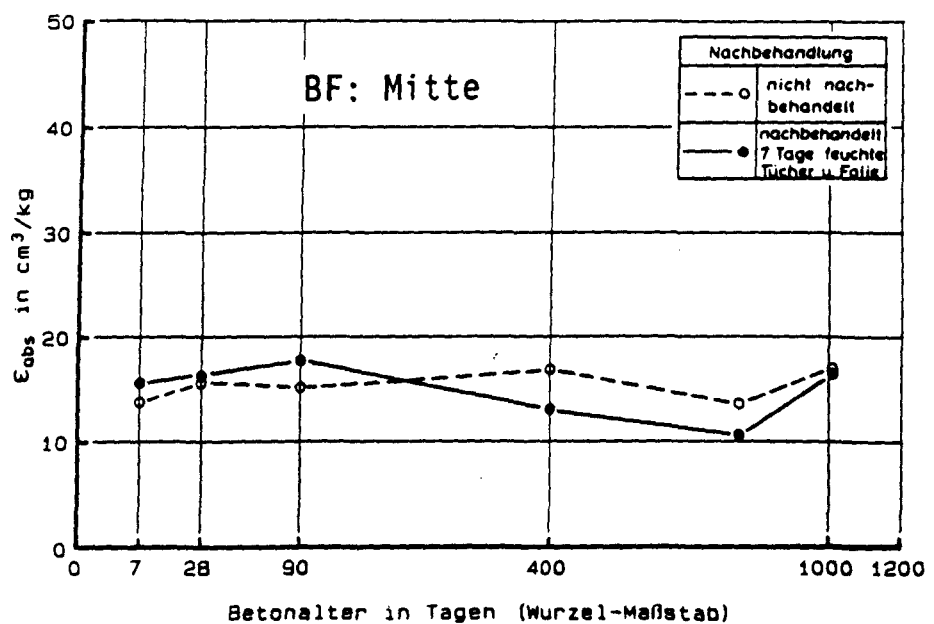
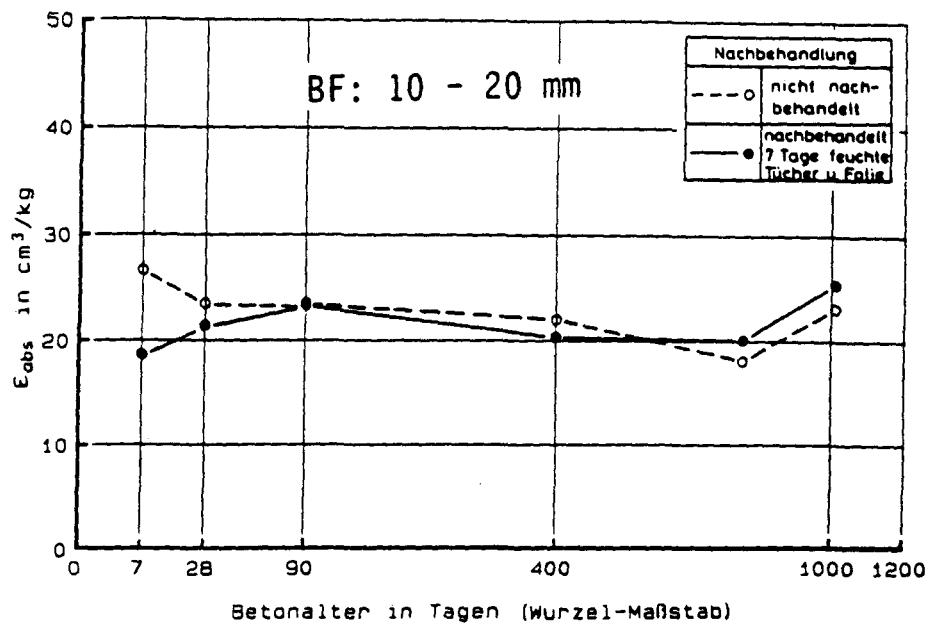
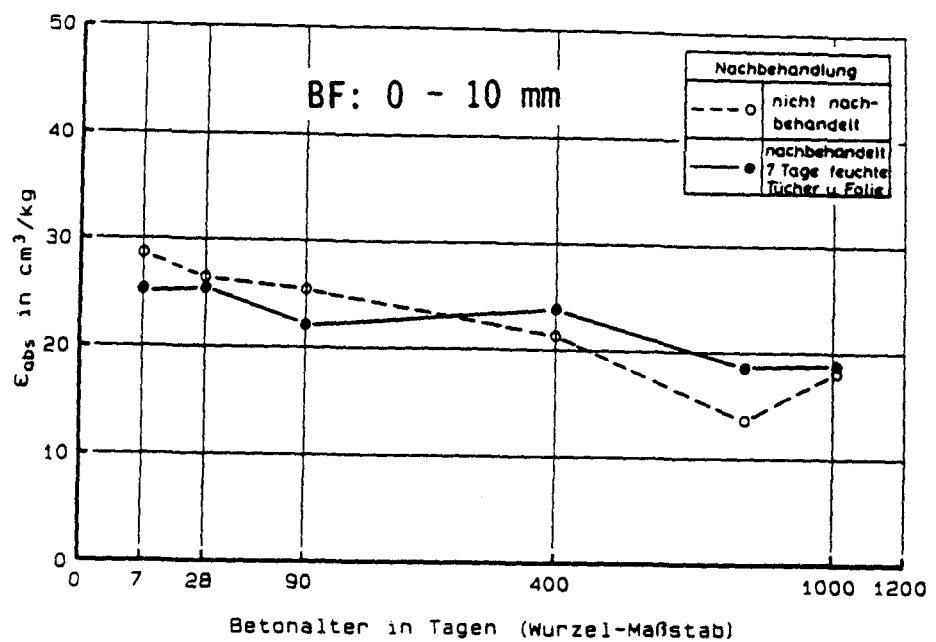


Bild D39

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

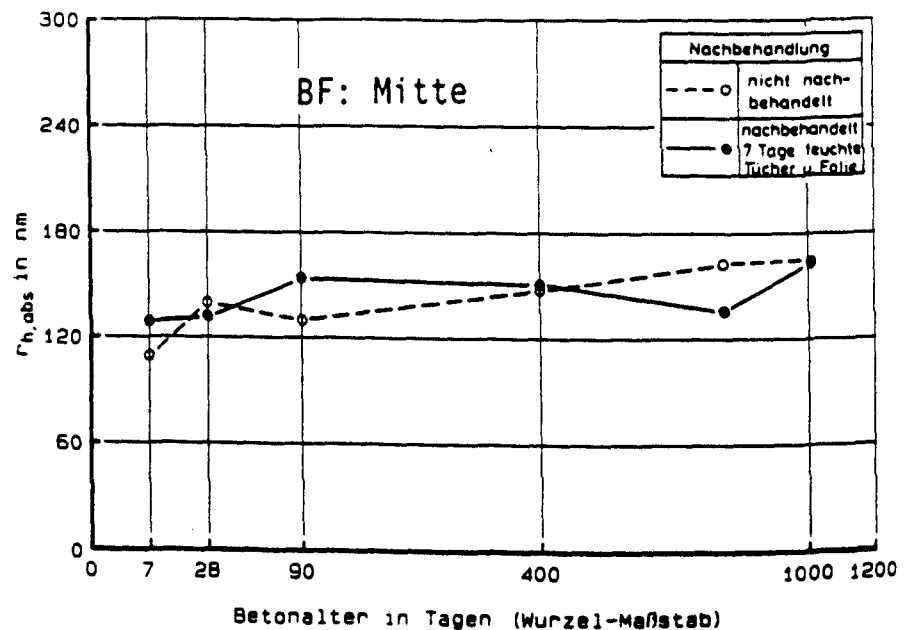
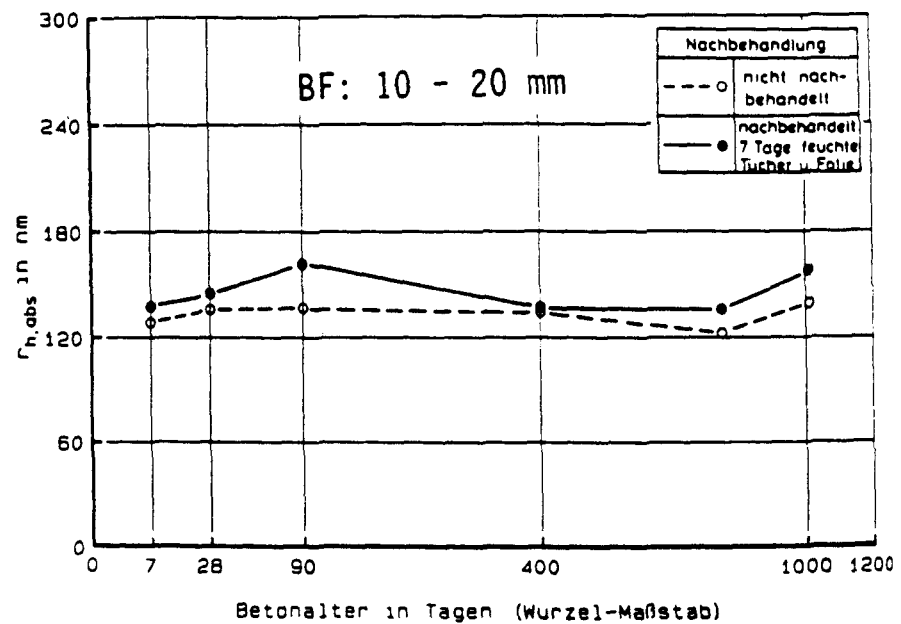
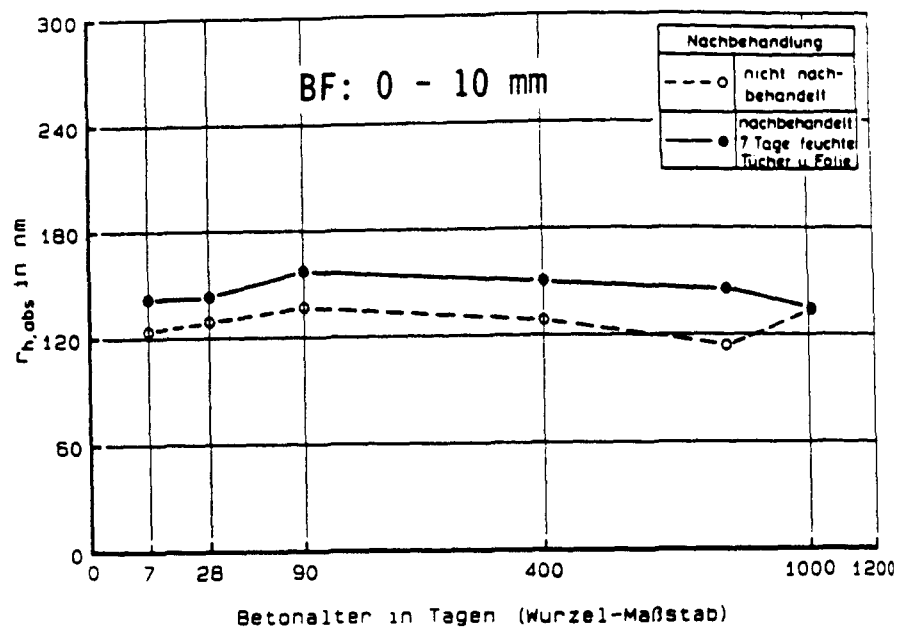


Bild D40

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BF in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

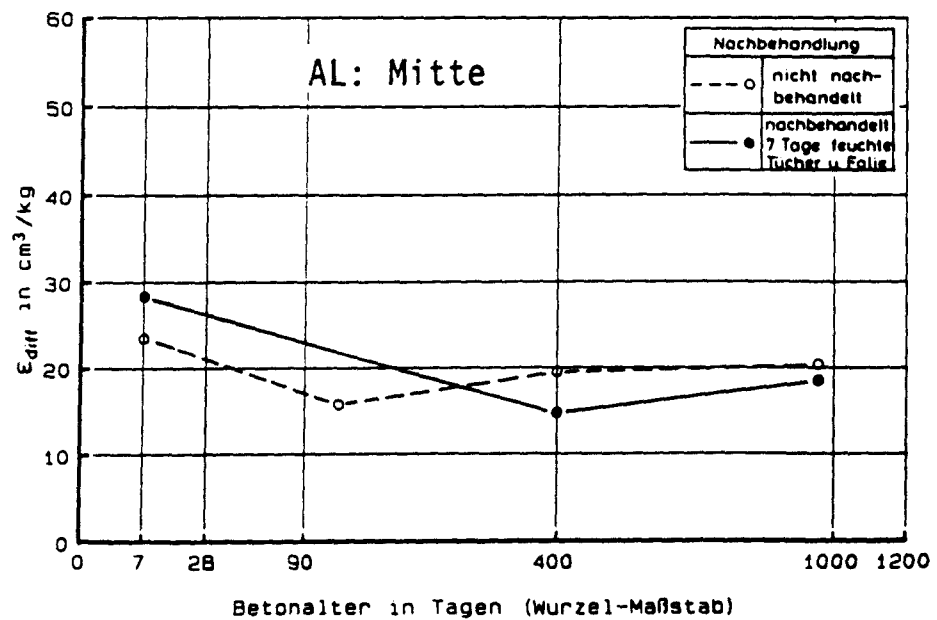
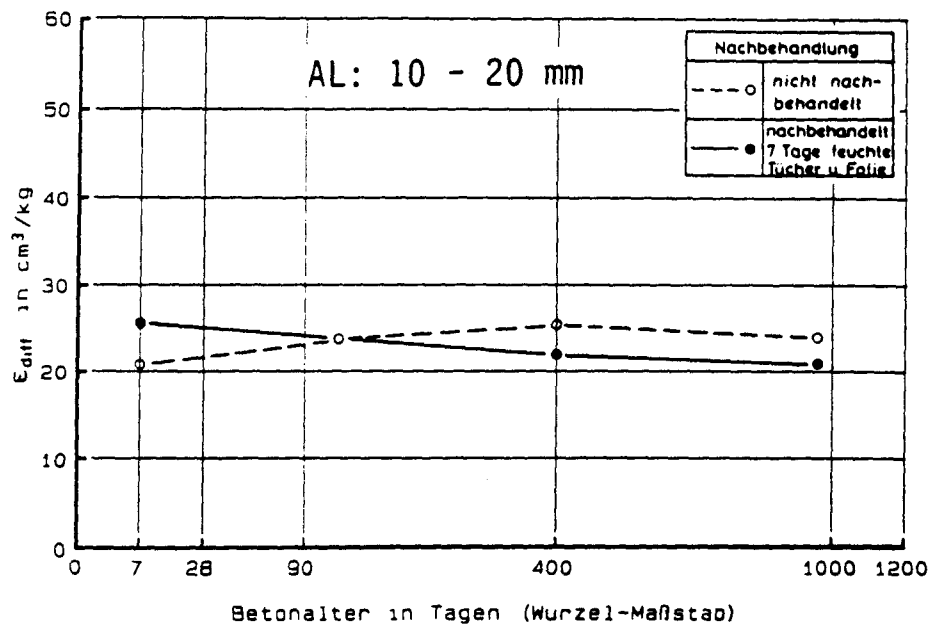
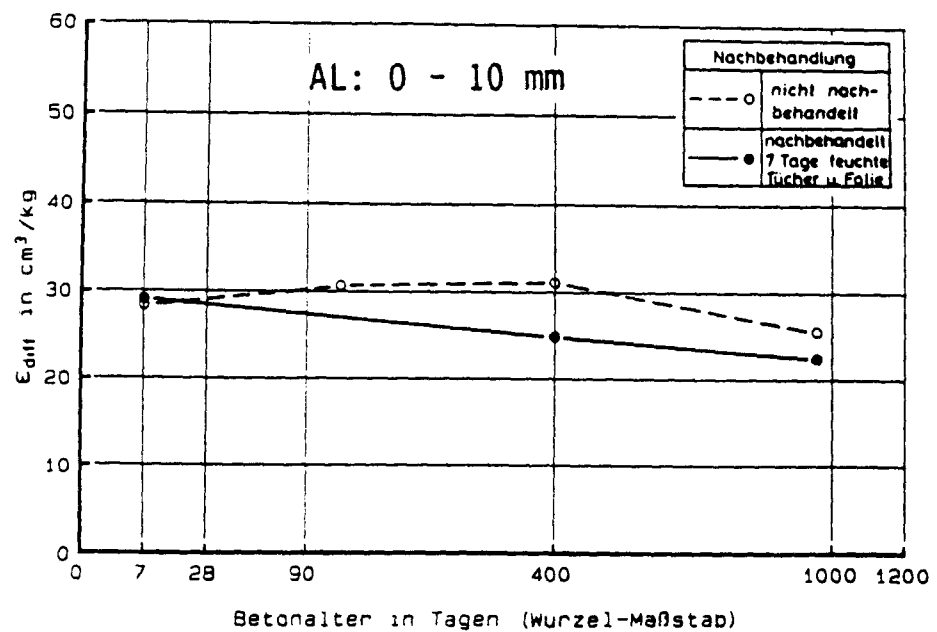


Bild D41

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

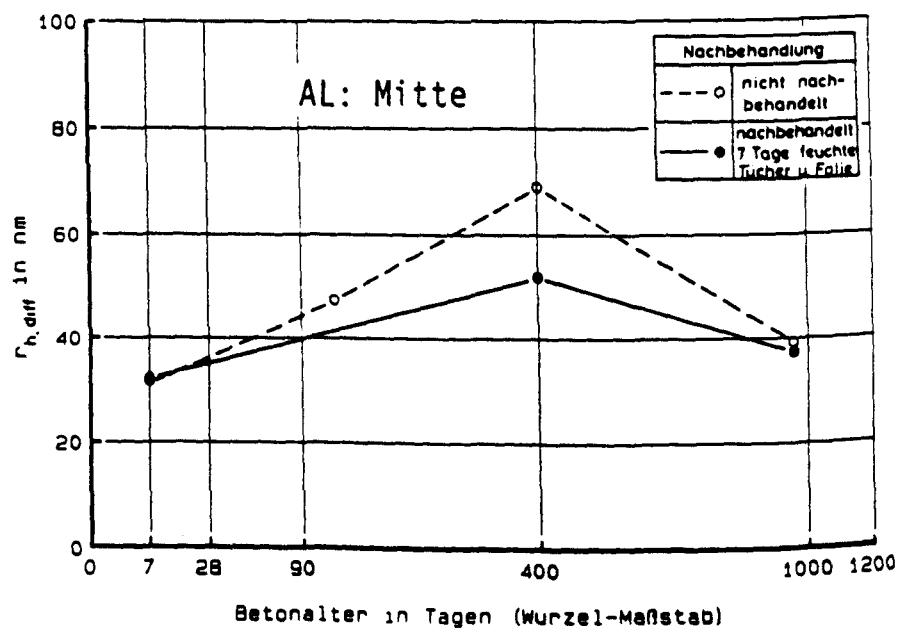
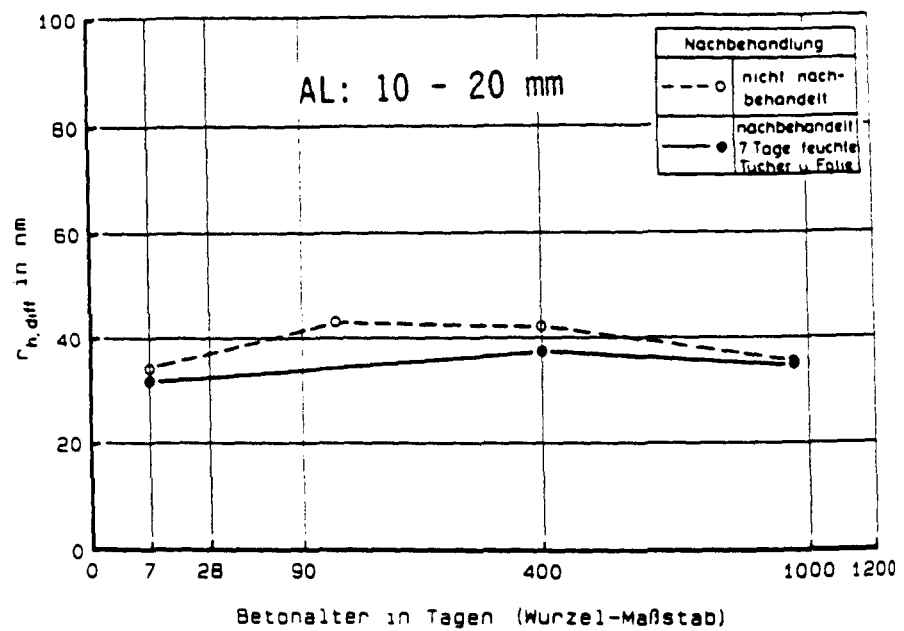
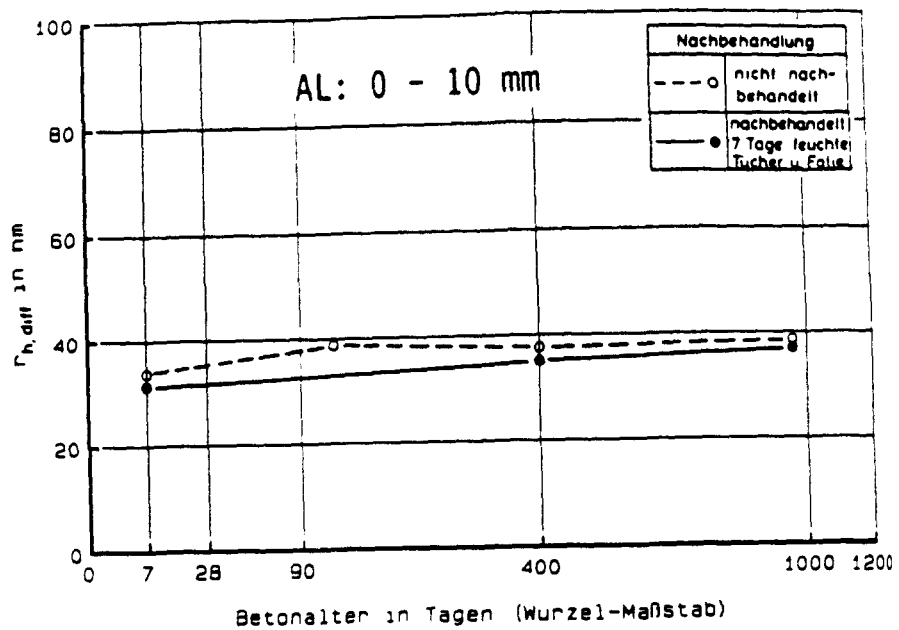


Bild D42

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

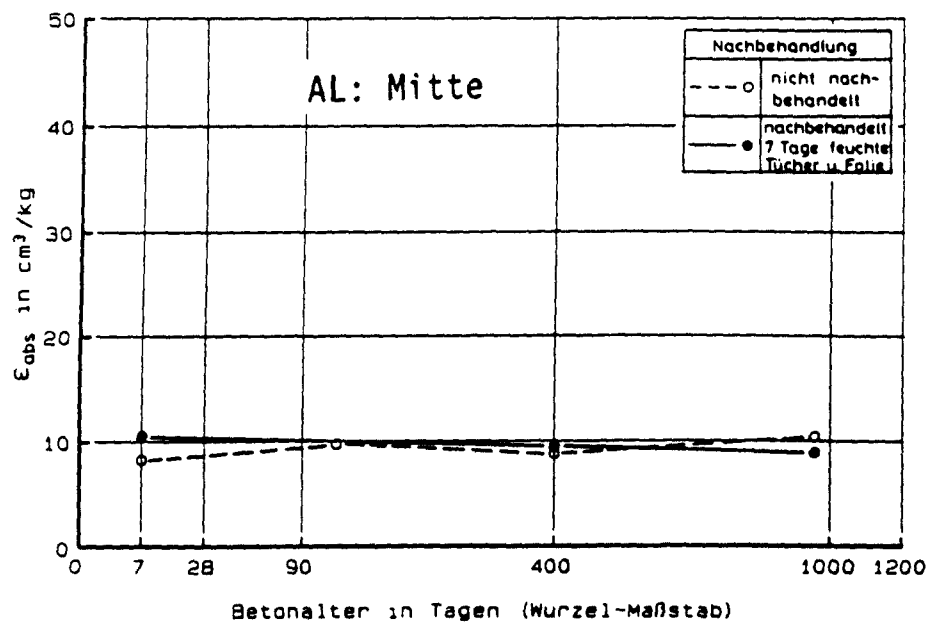
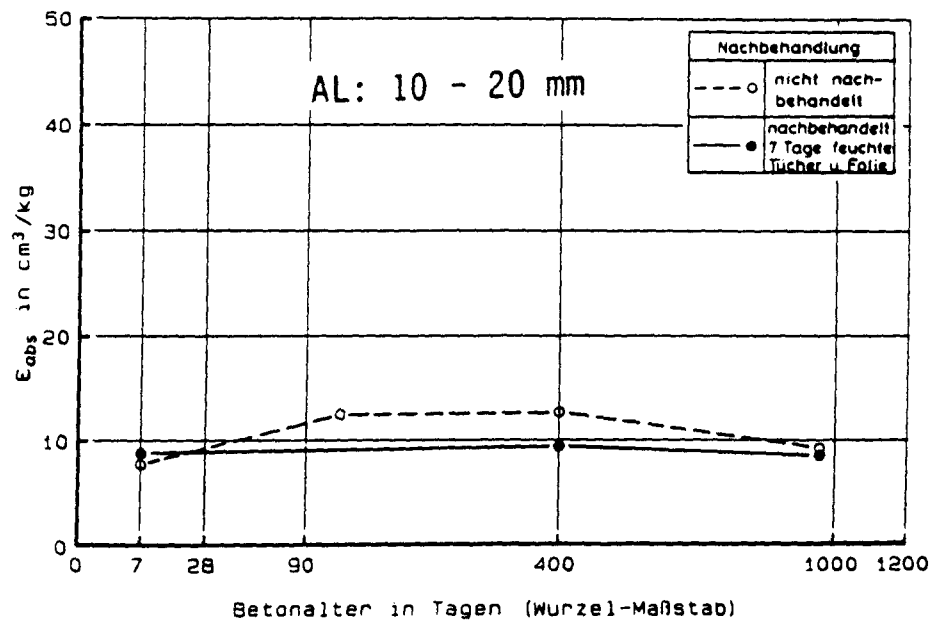
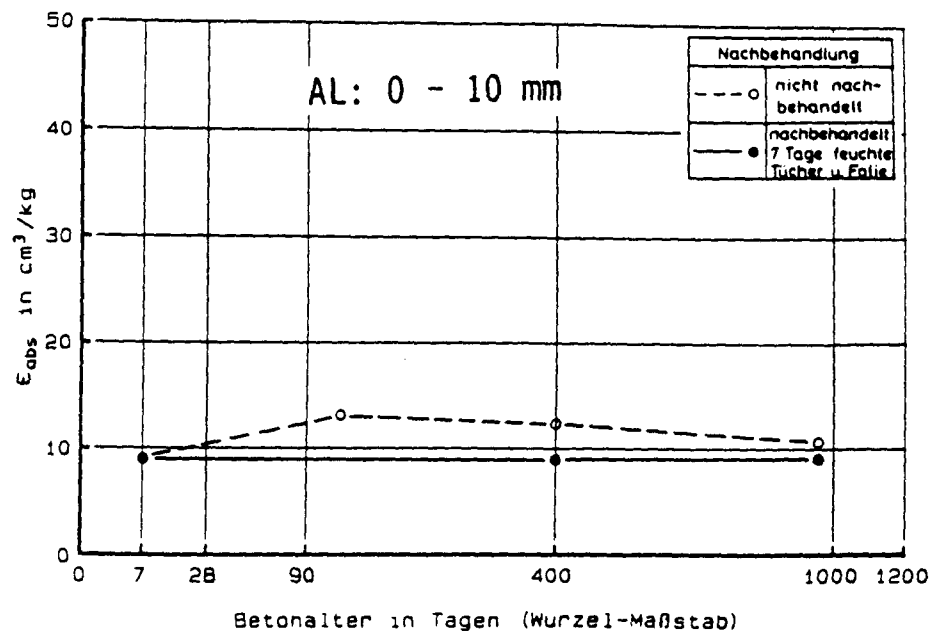


Bild D43

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

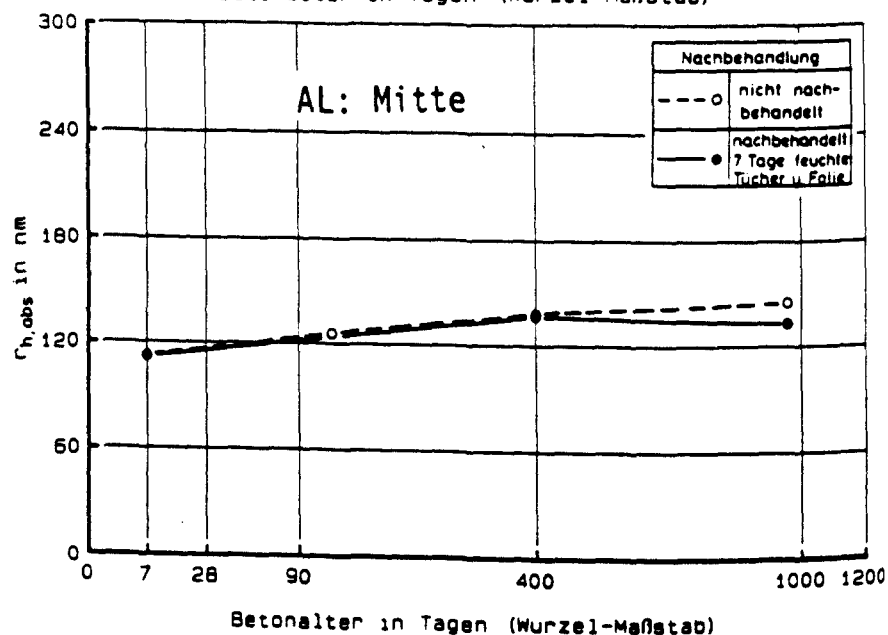
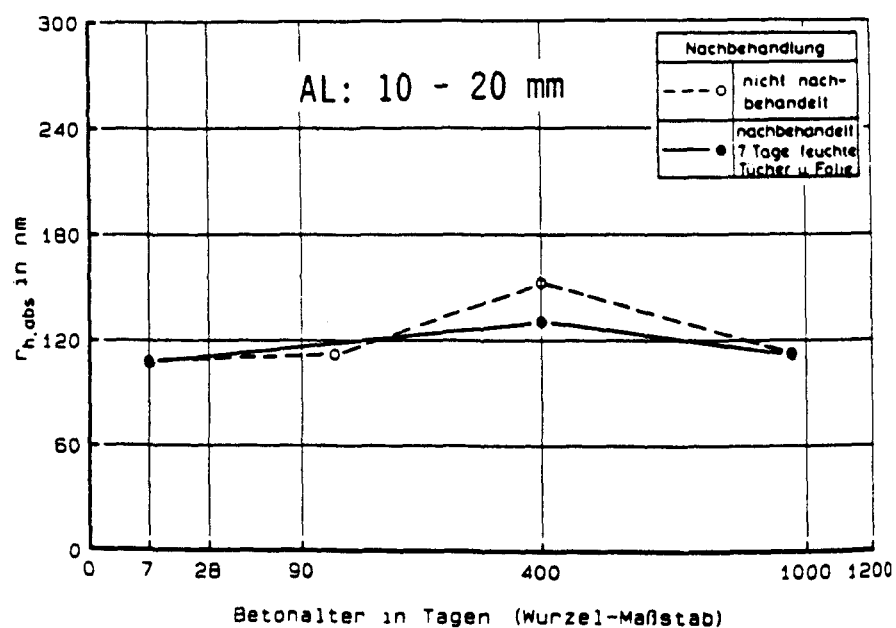
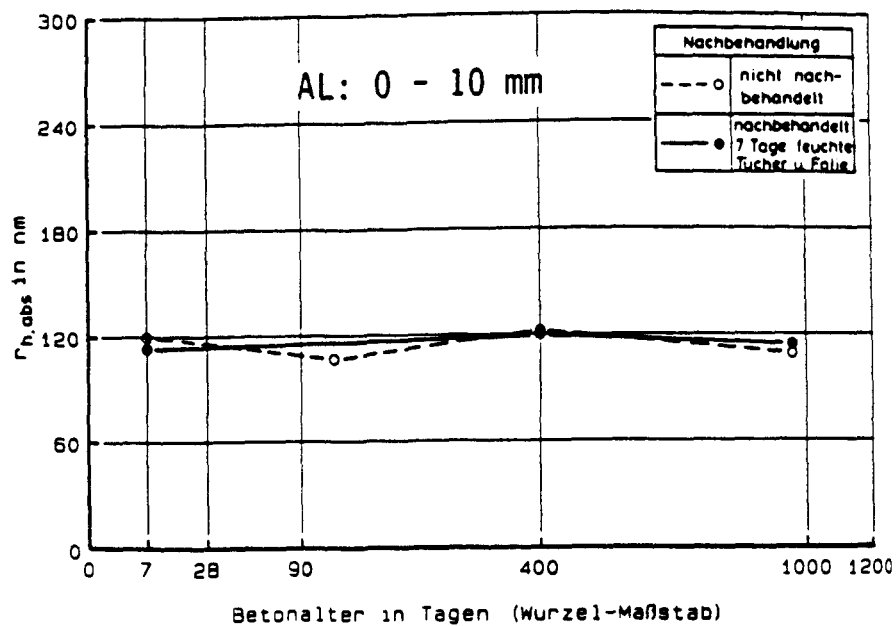


Bild D44

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand AL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

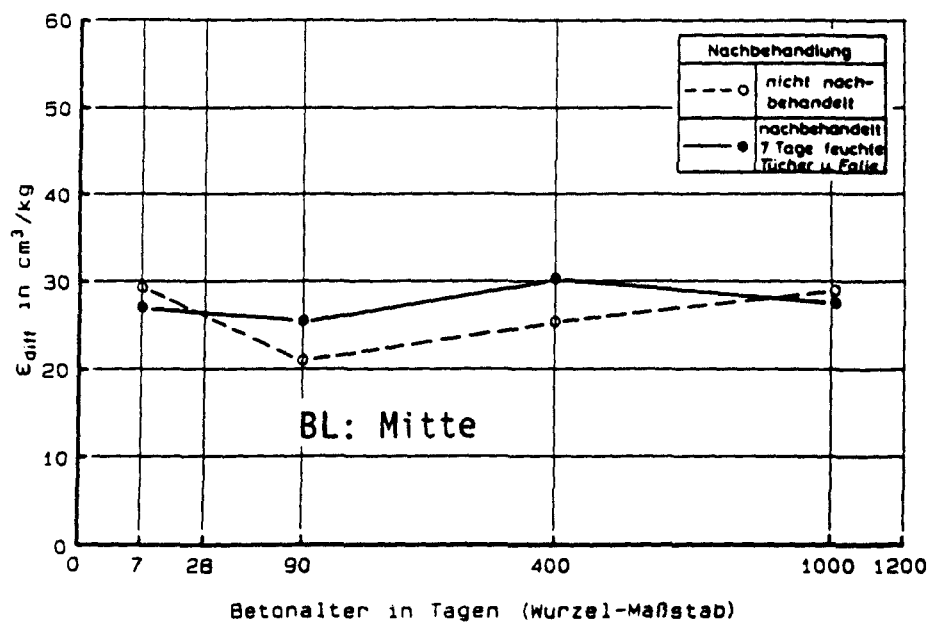
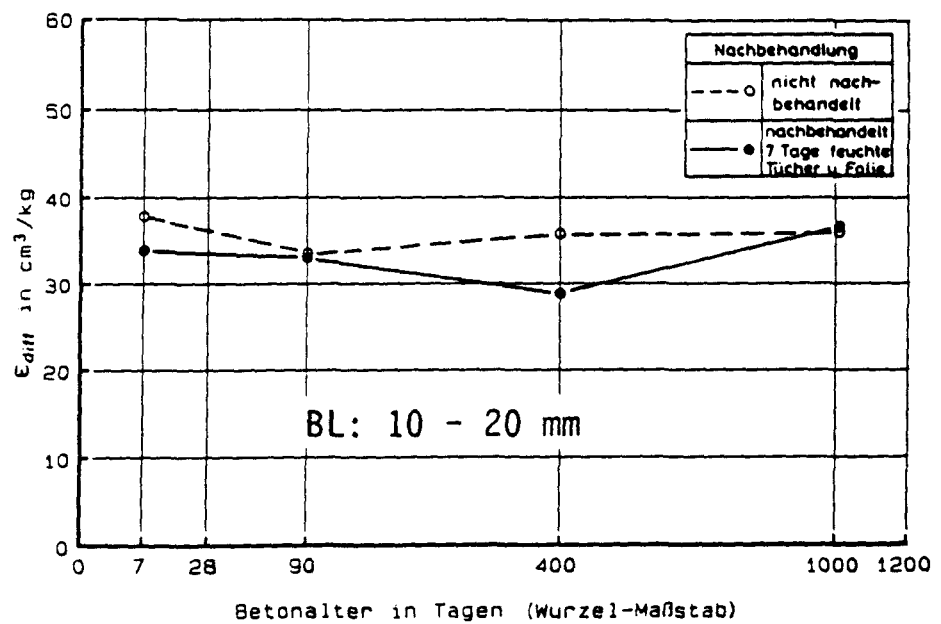
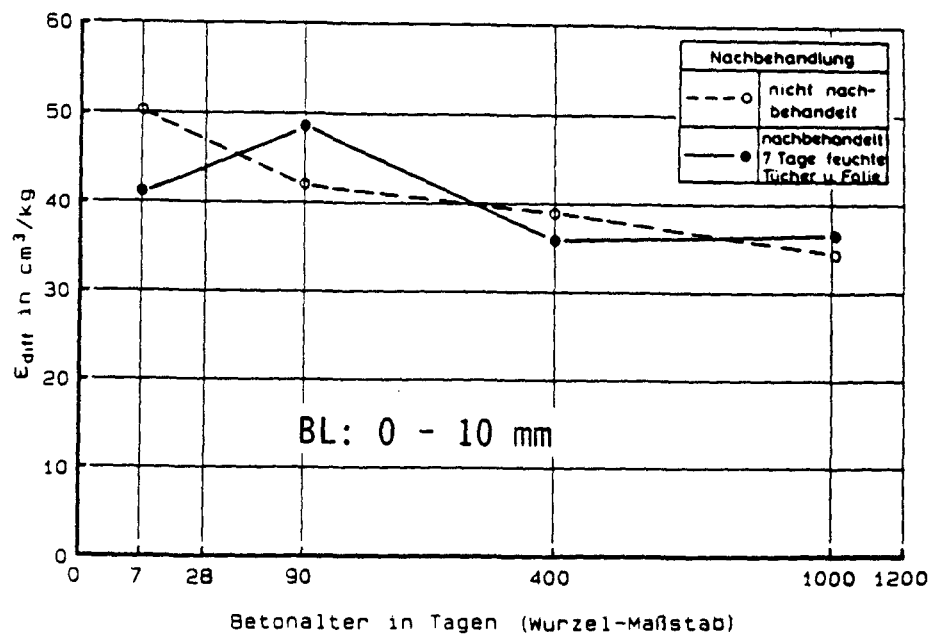


Bild D45

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

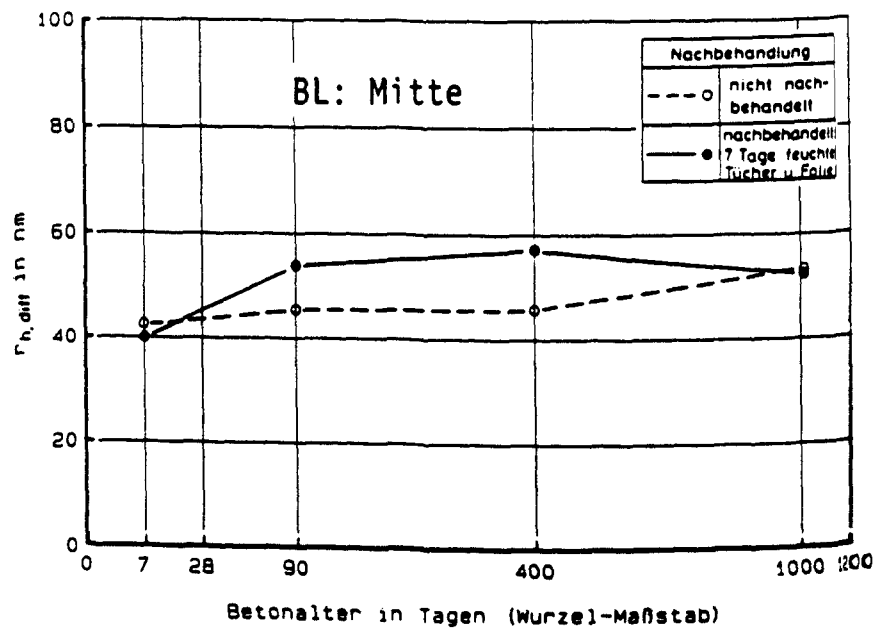
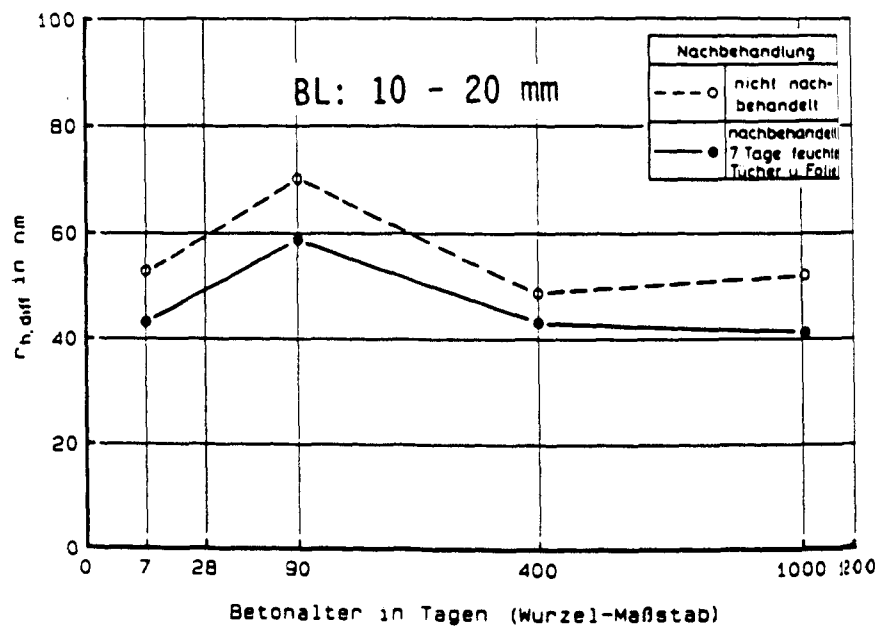
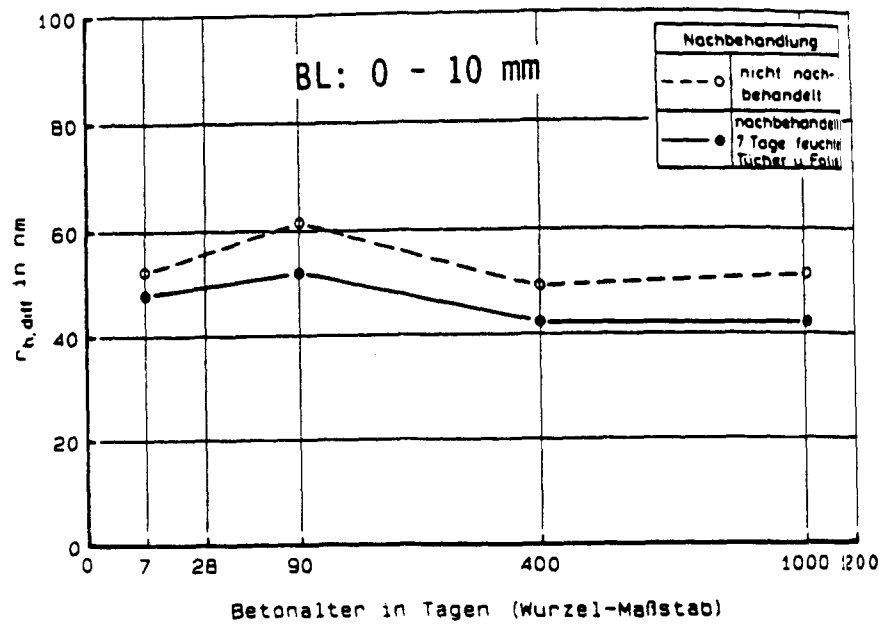


Bild D46

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

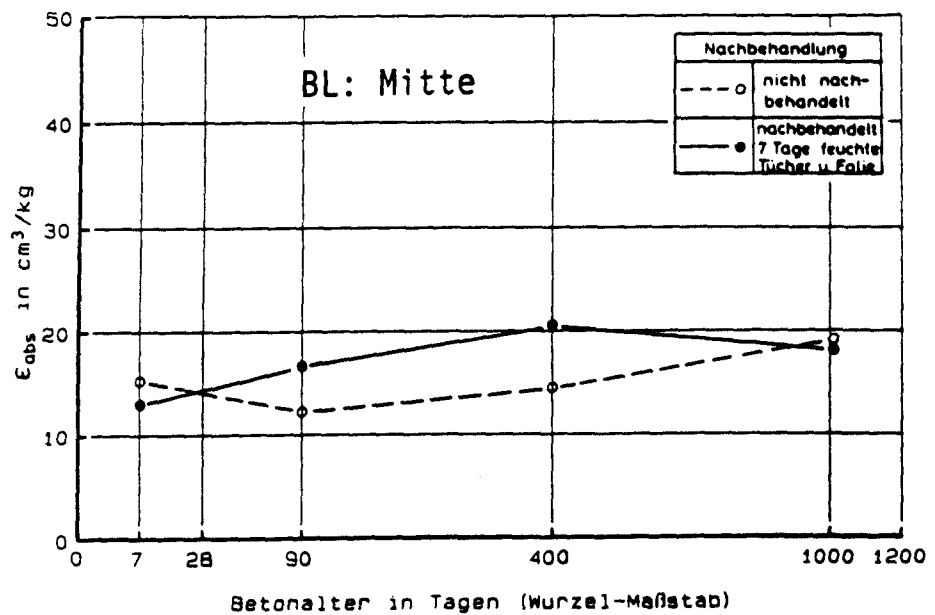
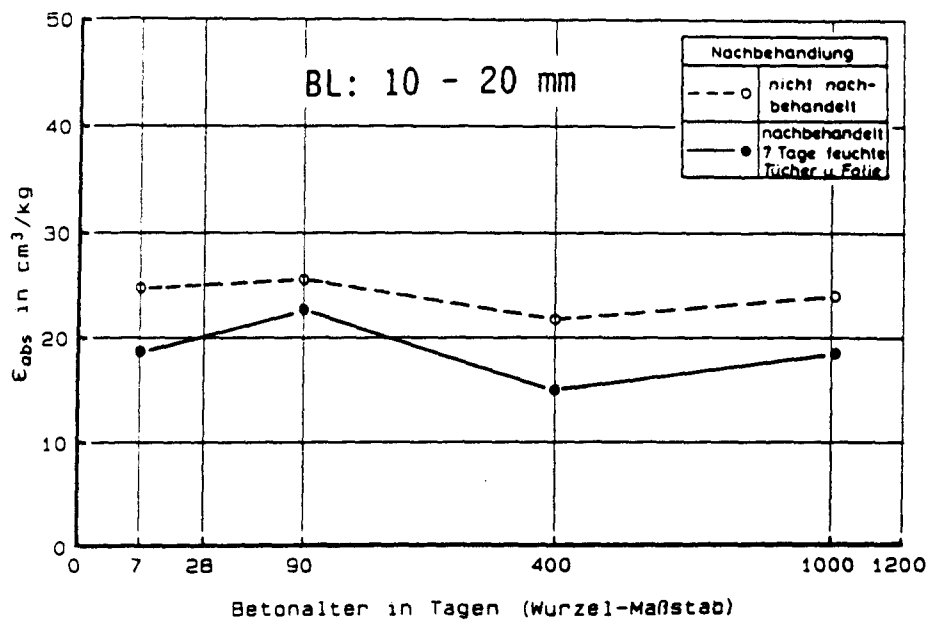
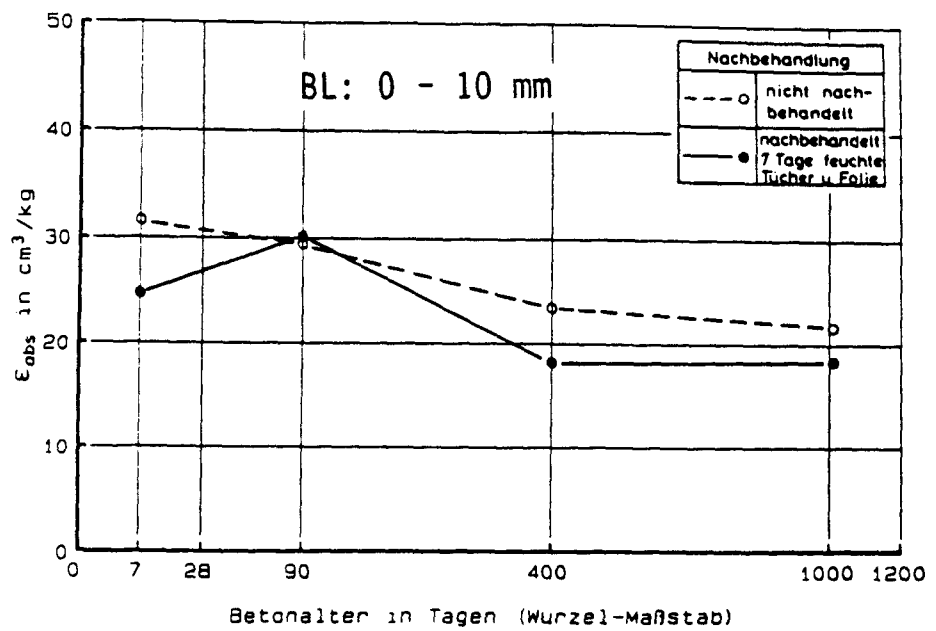


Bild D47

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

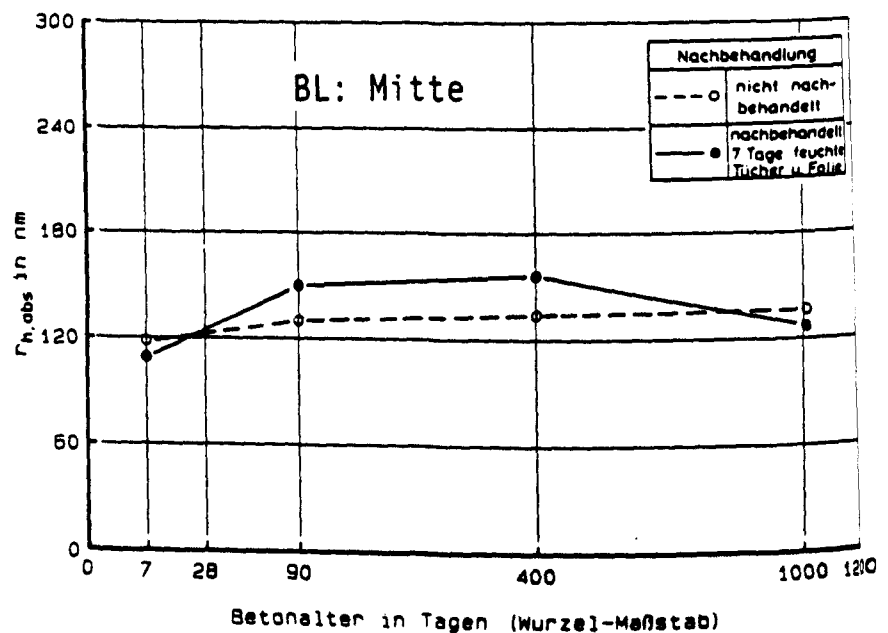
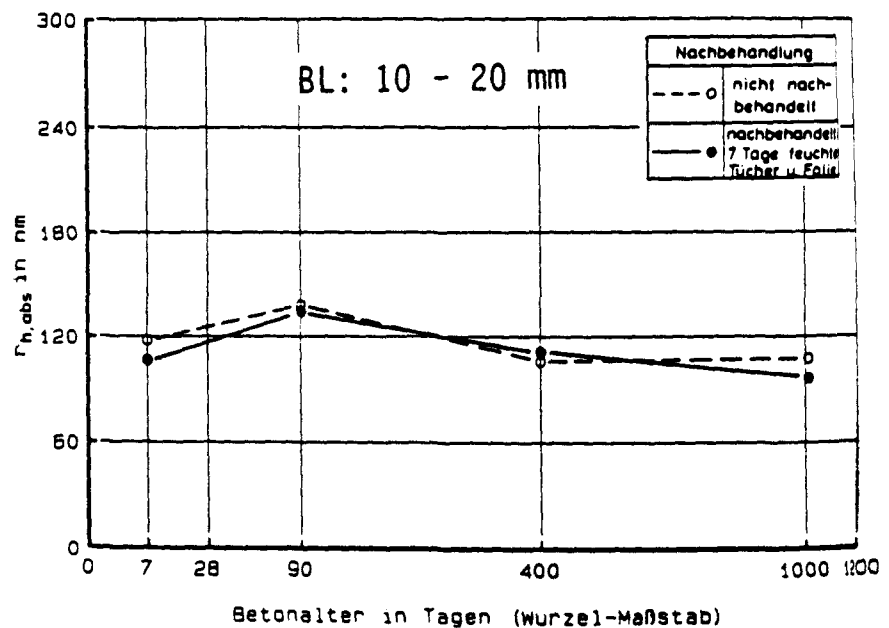
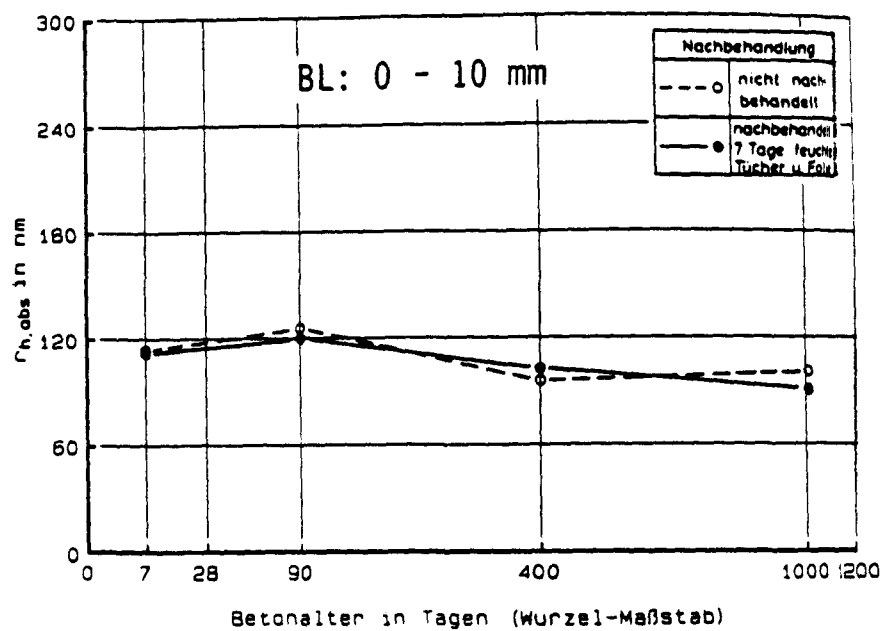


Bild D48

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand BL in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

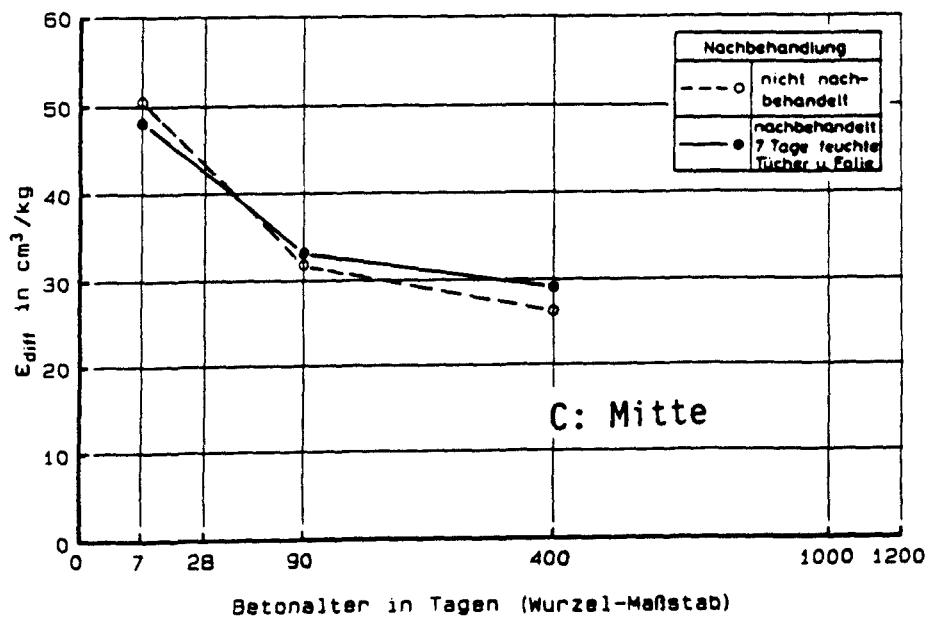
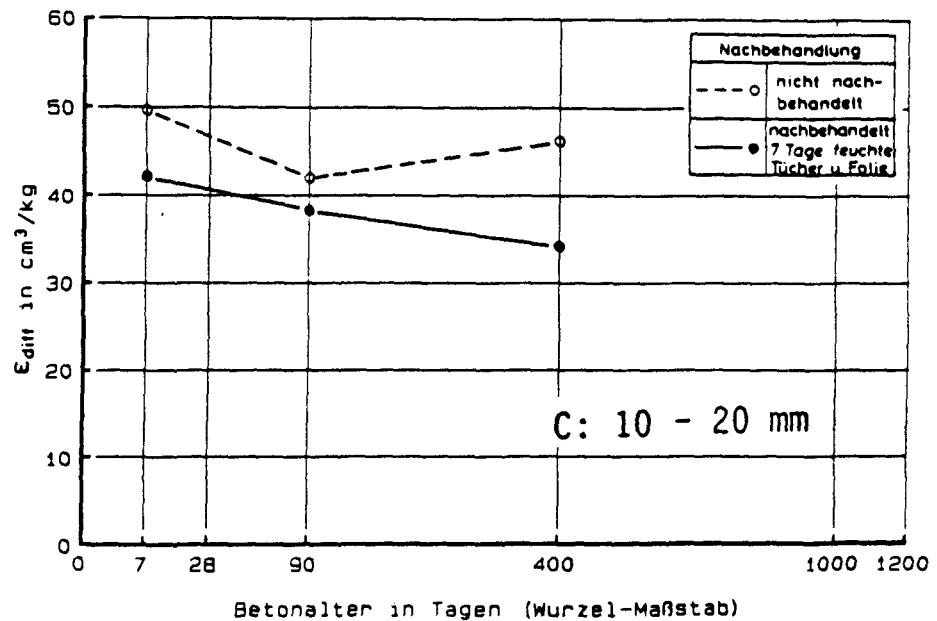
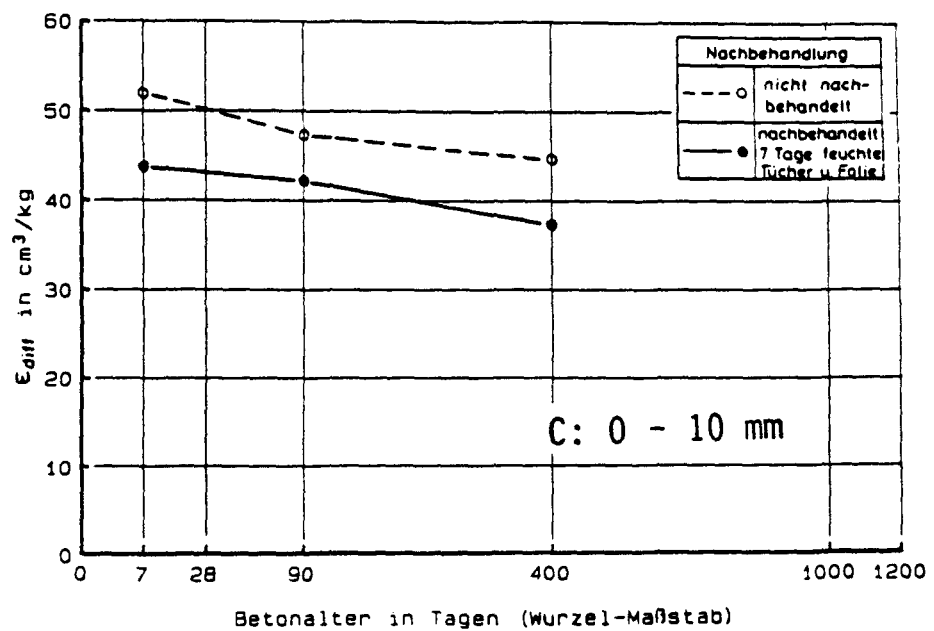


Bild D49

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand C in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

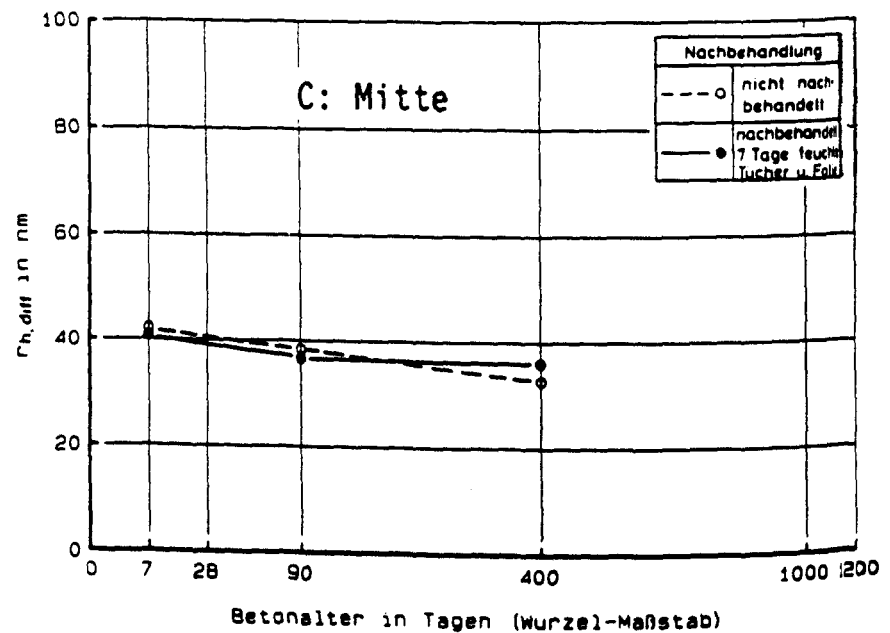
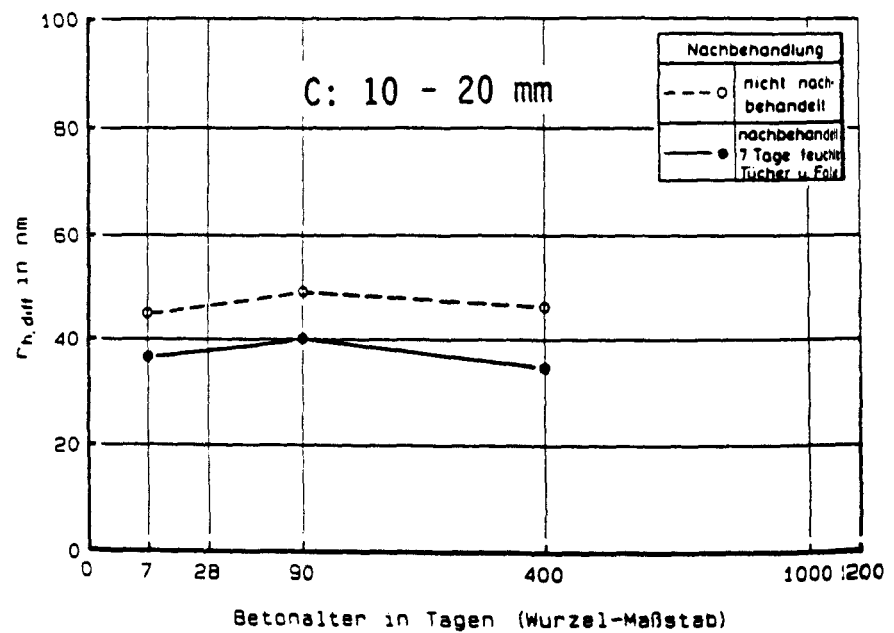
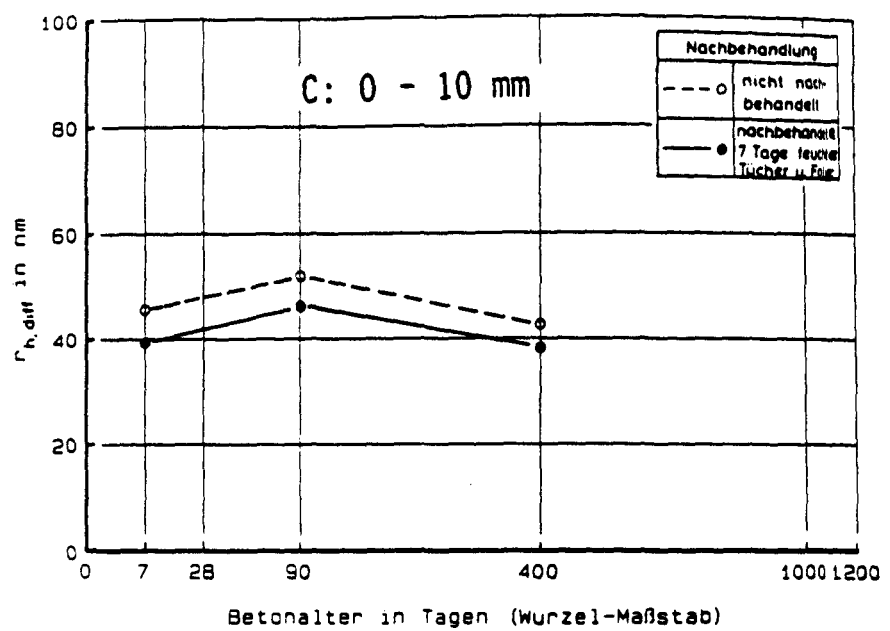


Bild D50

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand C in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

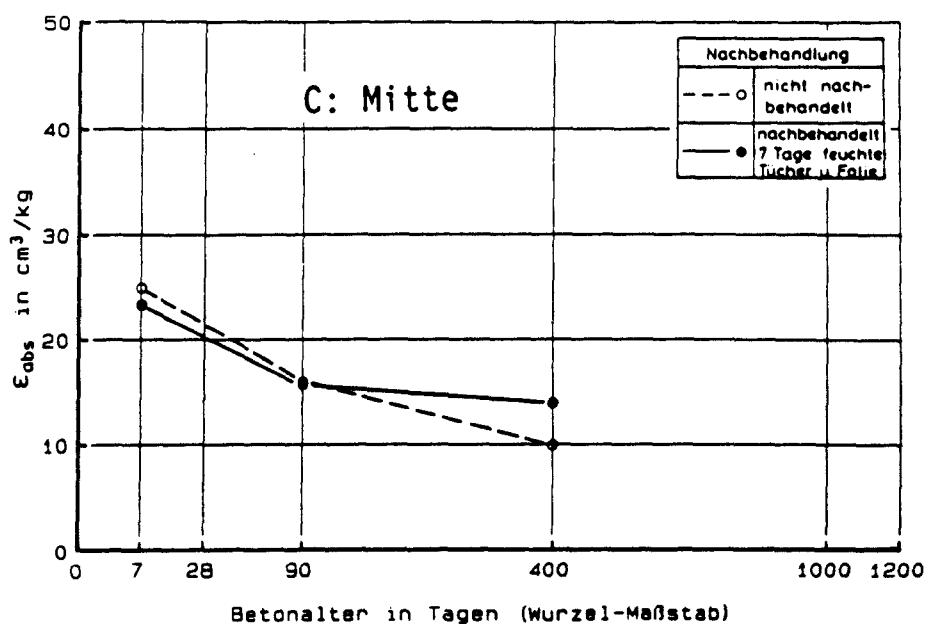
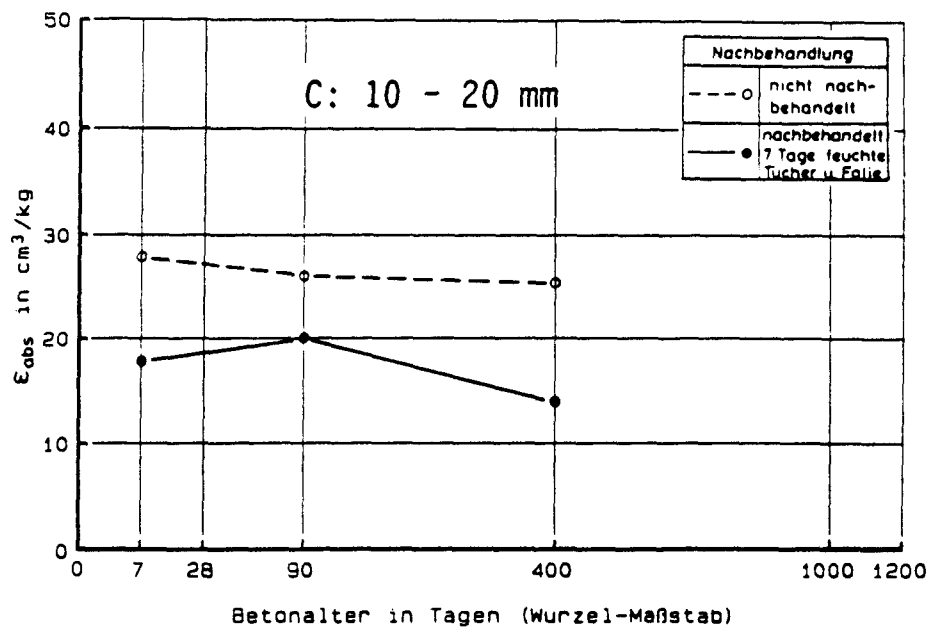
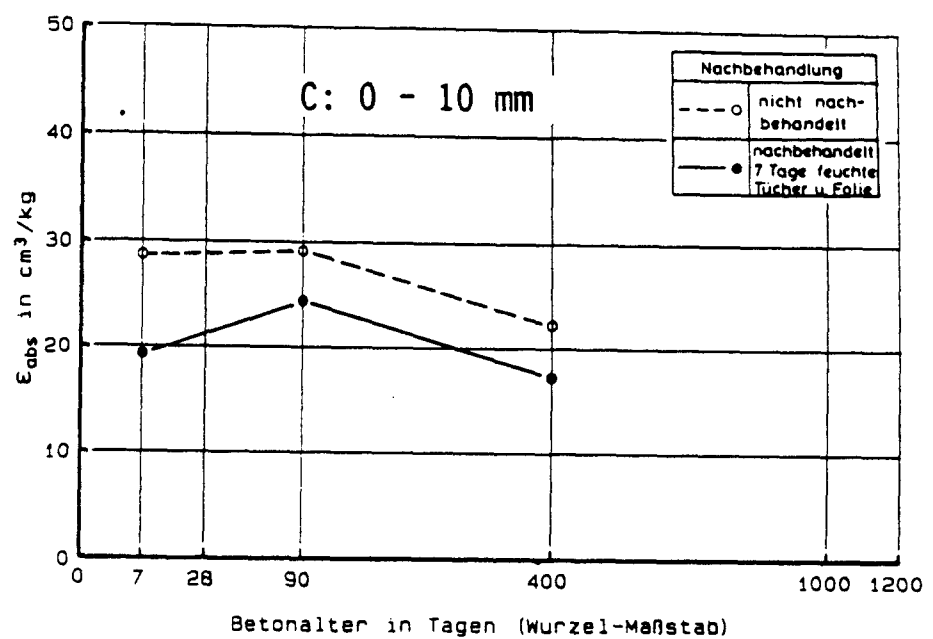


Bild D51

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand C in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

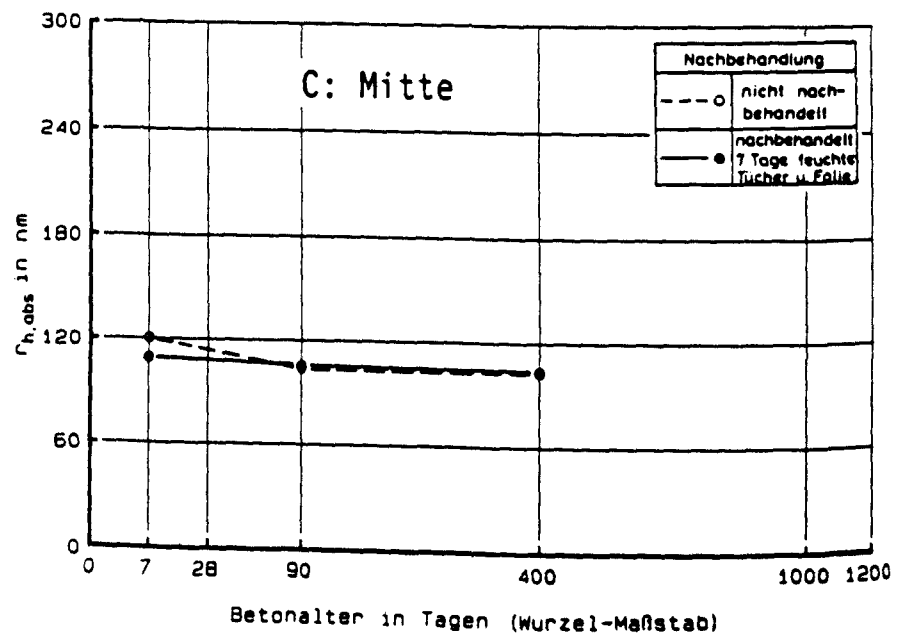
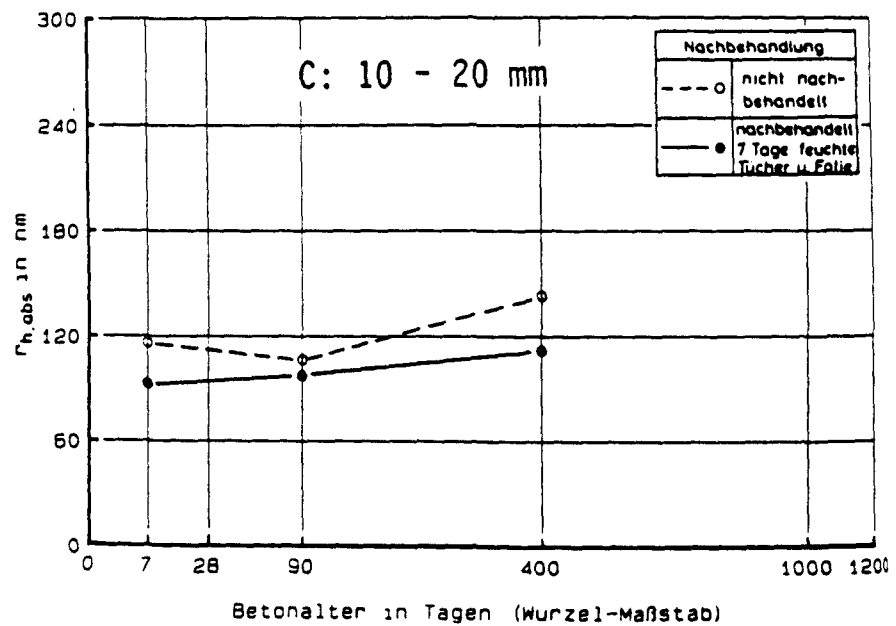
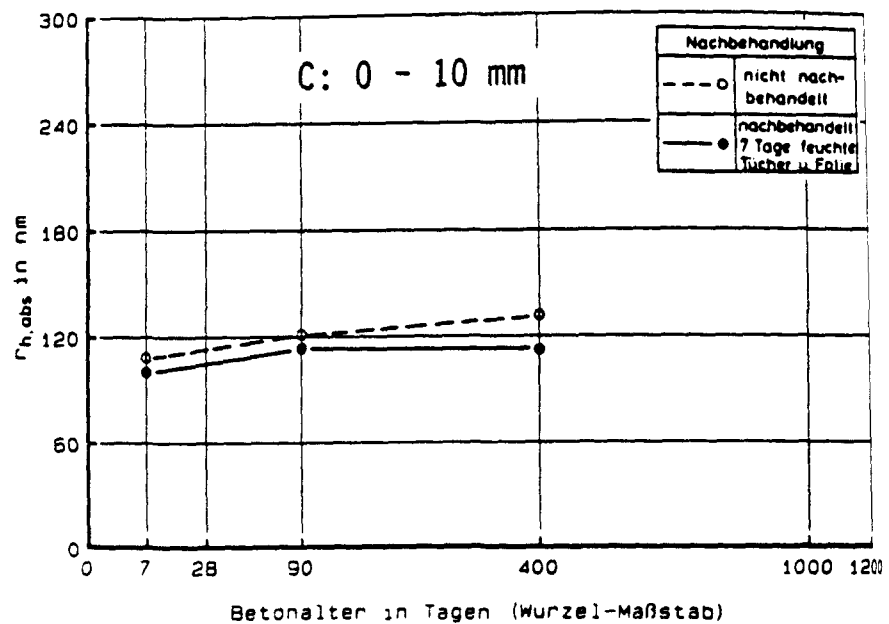


Bild D52

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand C in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

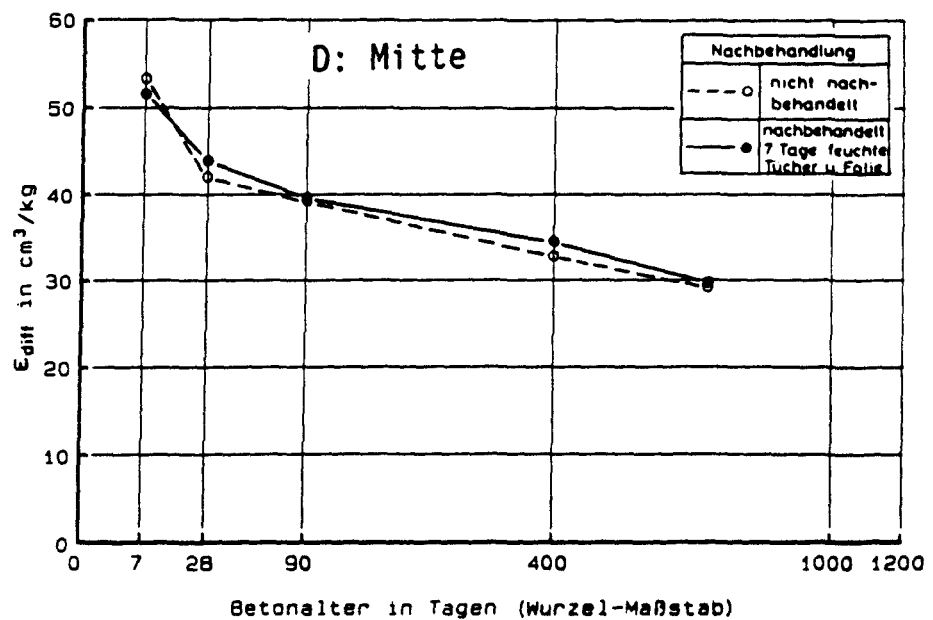
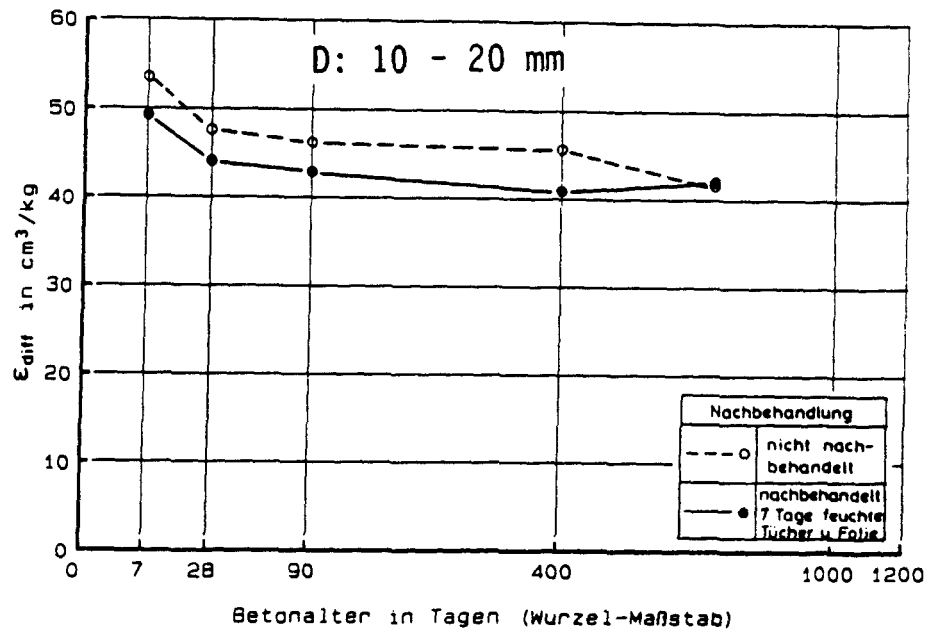
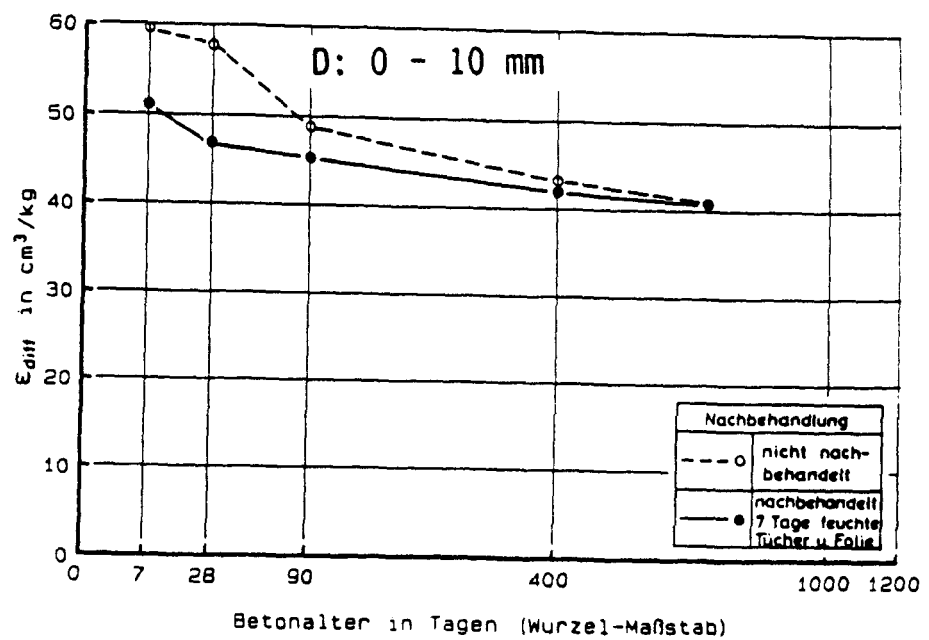


Bild D53

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand D in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

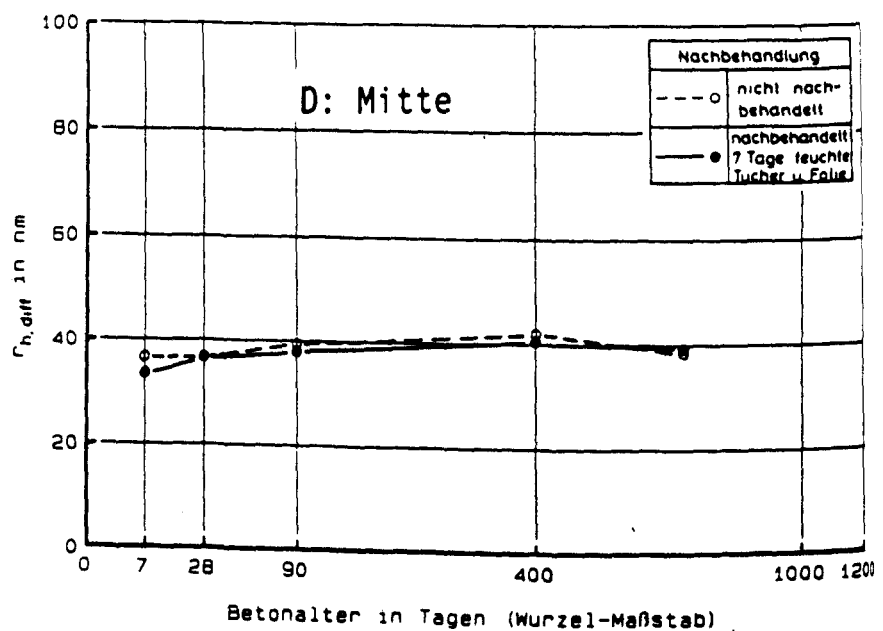
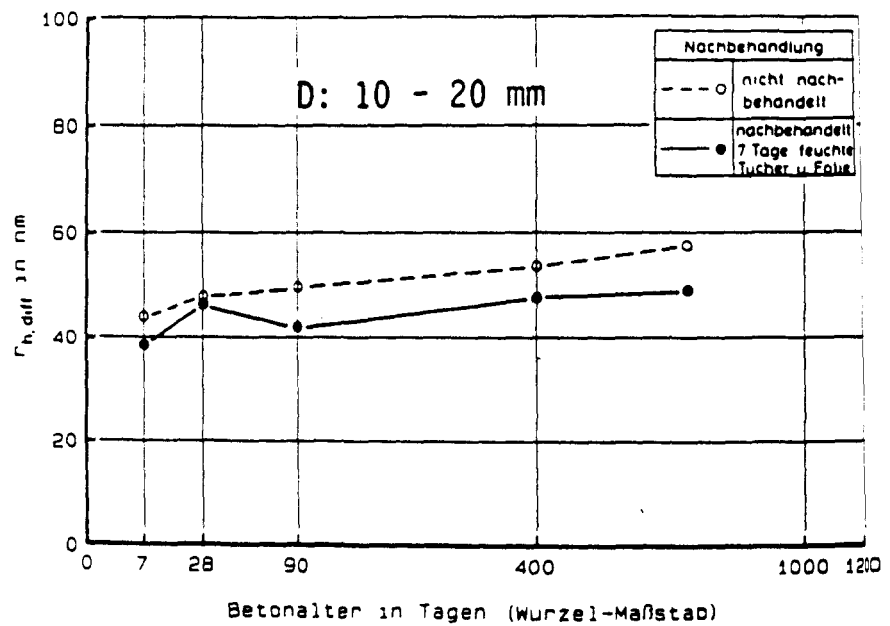
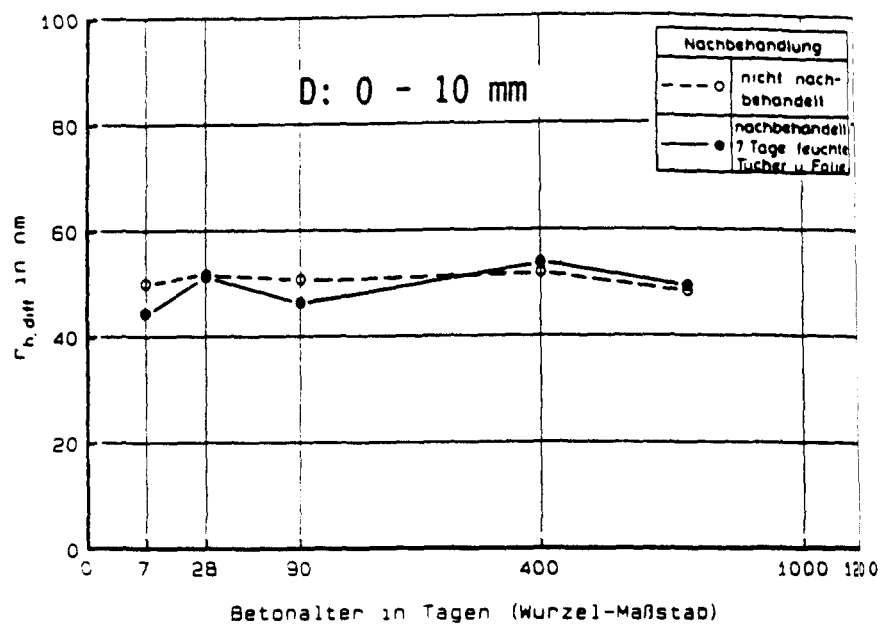


Bild D54

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand D in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

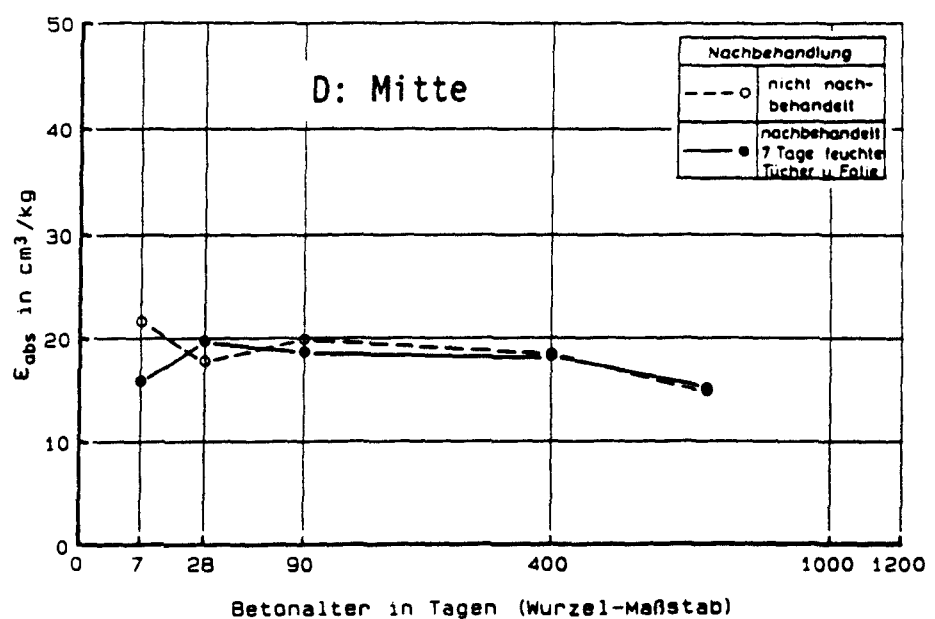
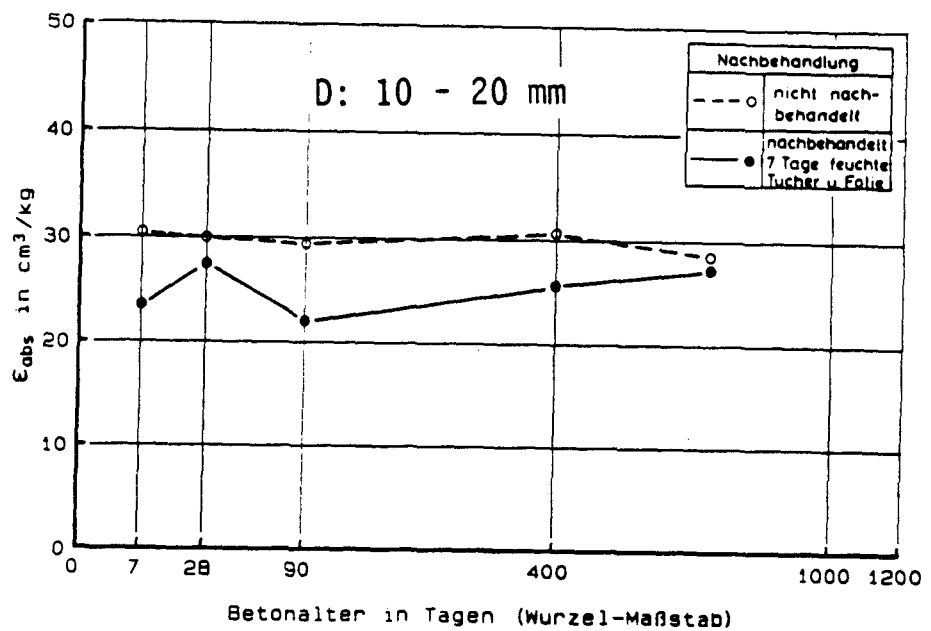
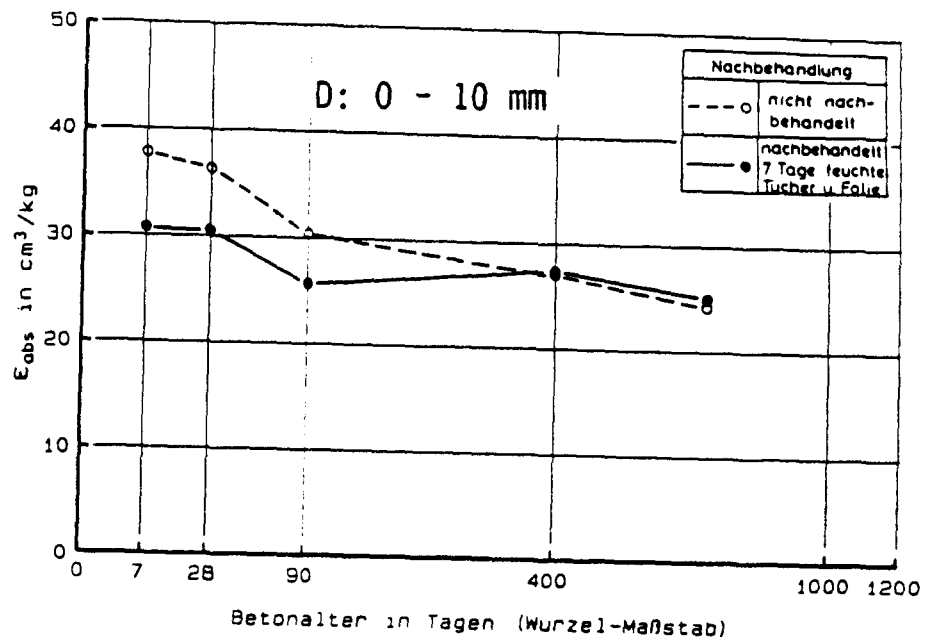


Bild D55

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand D in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

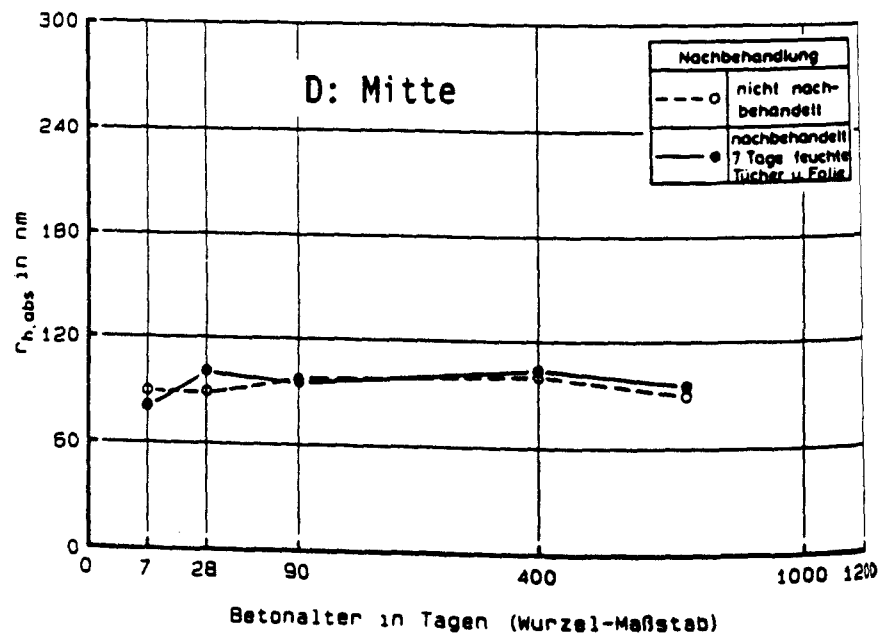
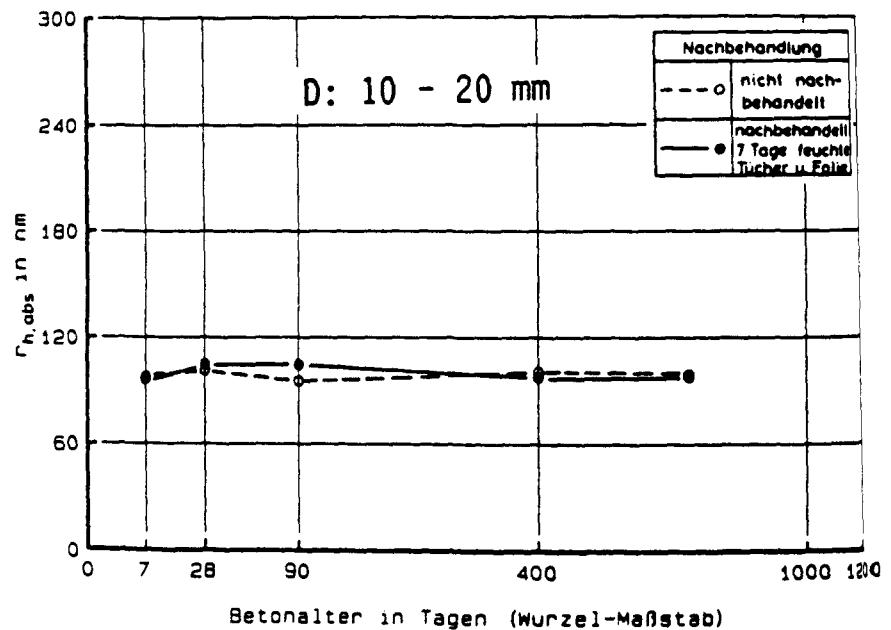
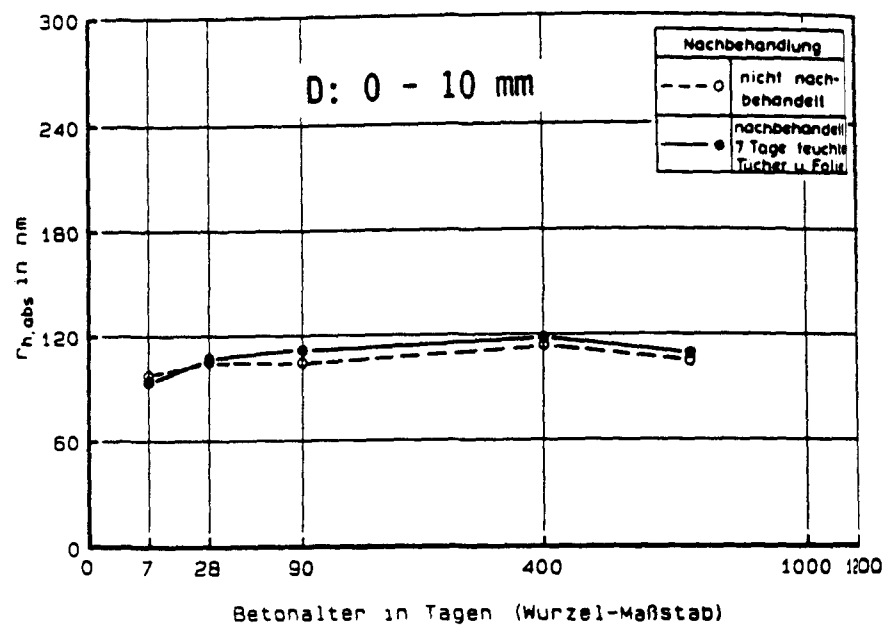


Bild D56

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der Wand D in Abhängigkeit der Nachbehandlung.

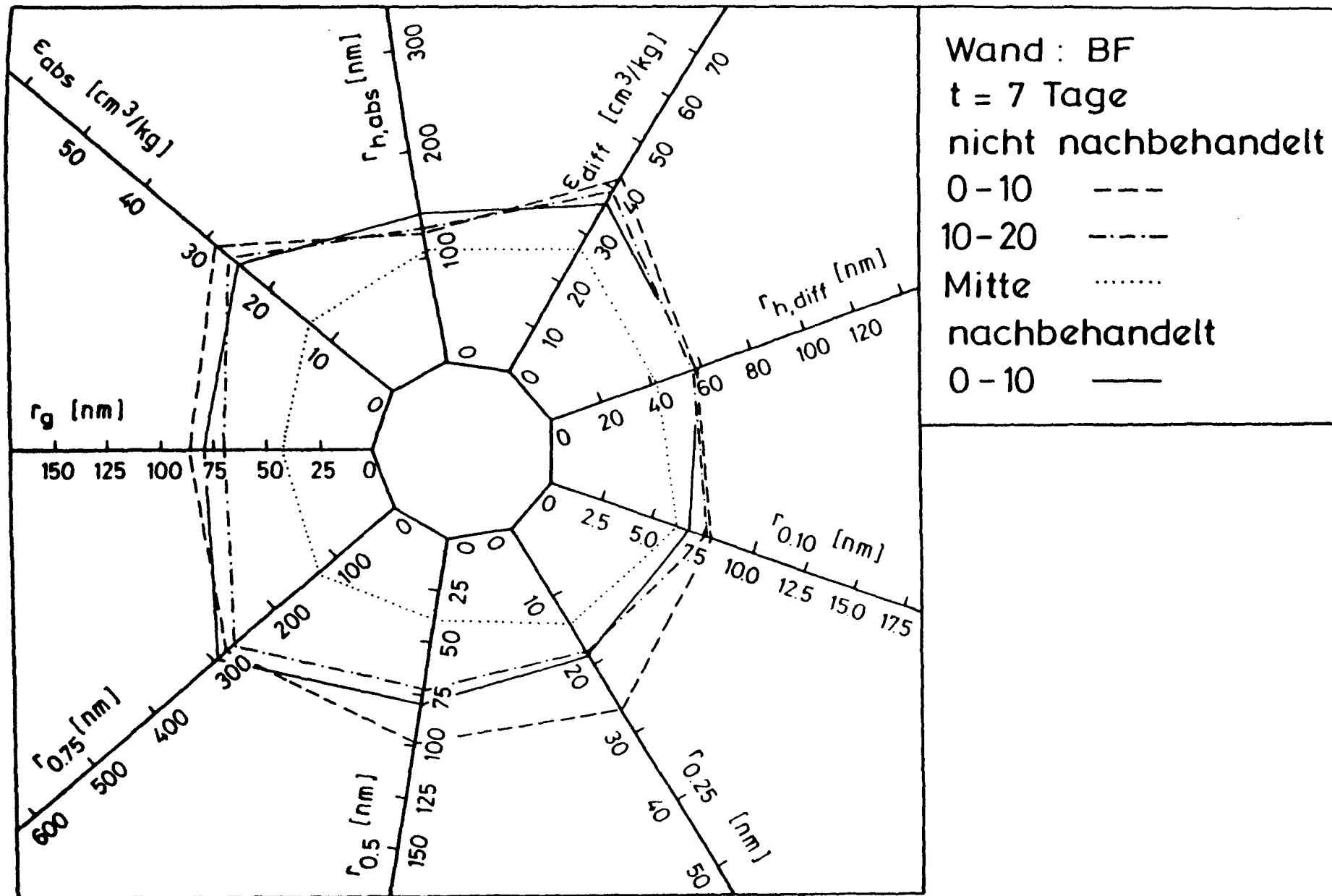


Bild D57: Beurteilung der Betonqualität des Betons der Wand BF im Alter von 7 Tagen an Hand der Kenngrößen der Porenradienverteilung.

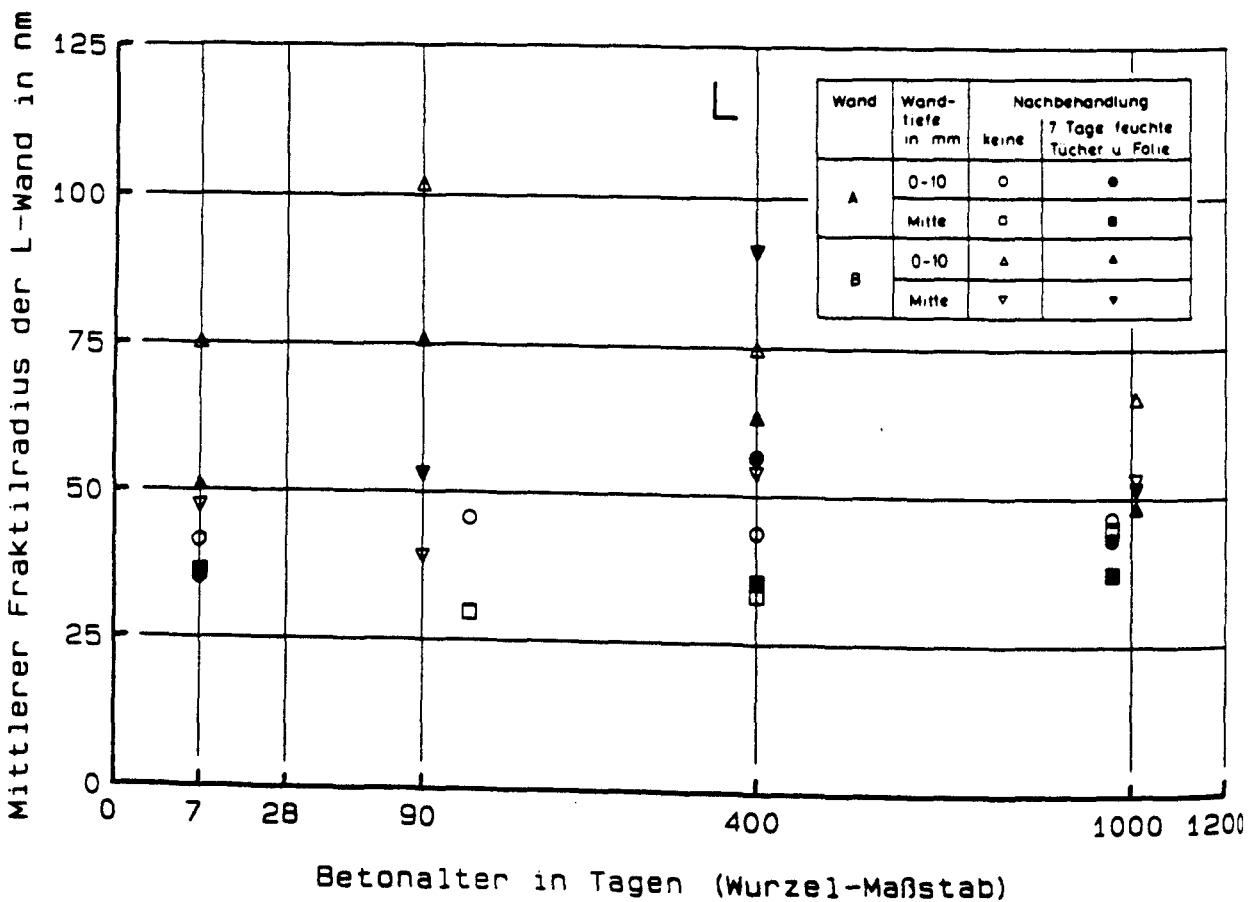
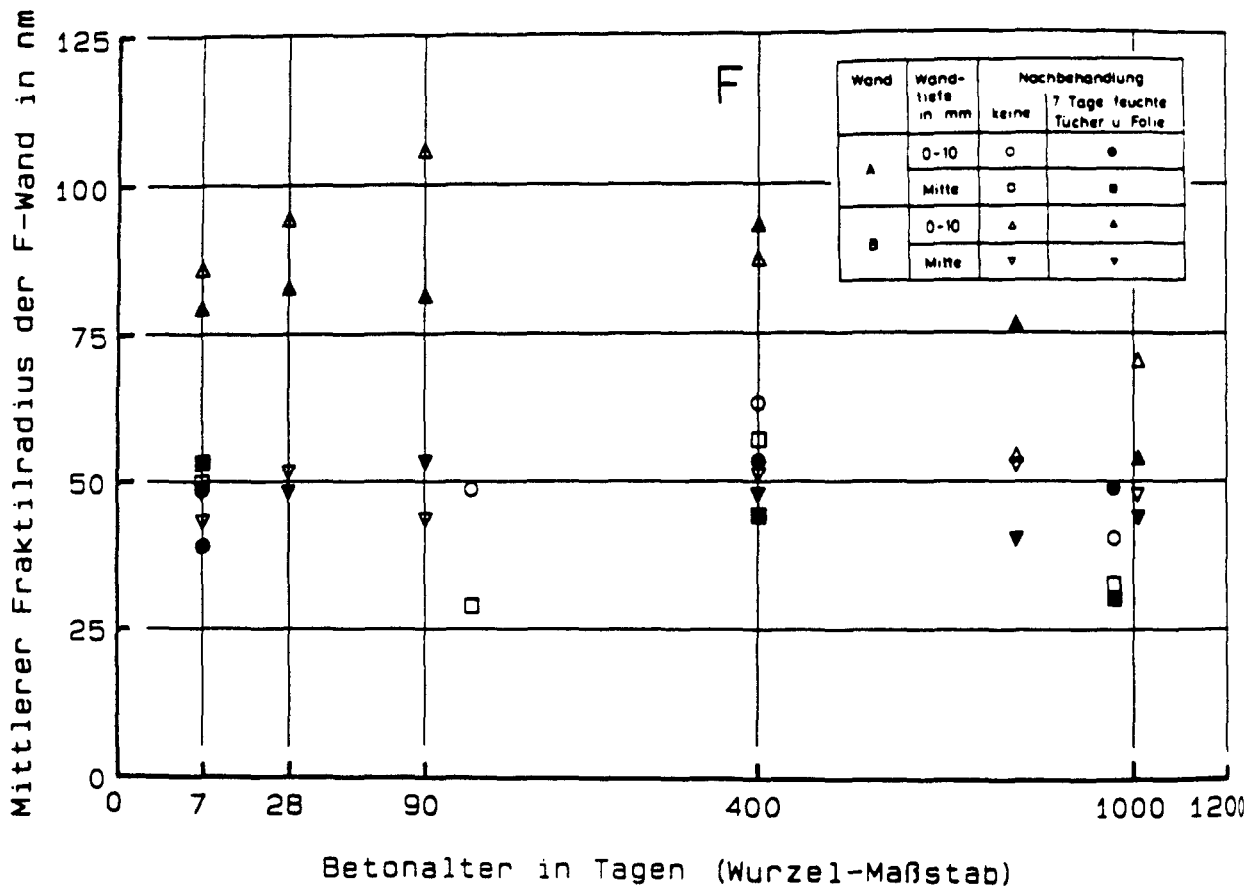


Bild D58

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktilradius r_g für die im Labor (untere Bildhälfte) und im Freien (obere Bildhälfte) aufgestellten Wände A und B getrennt nach Wandtiefe und Nachbehandlung.

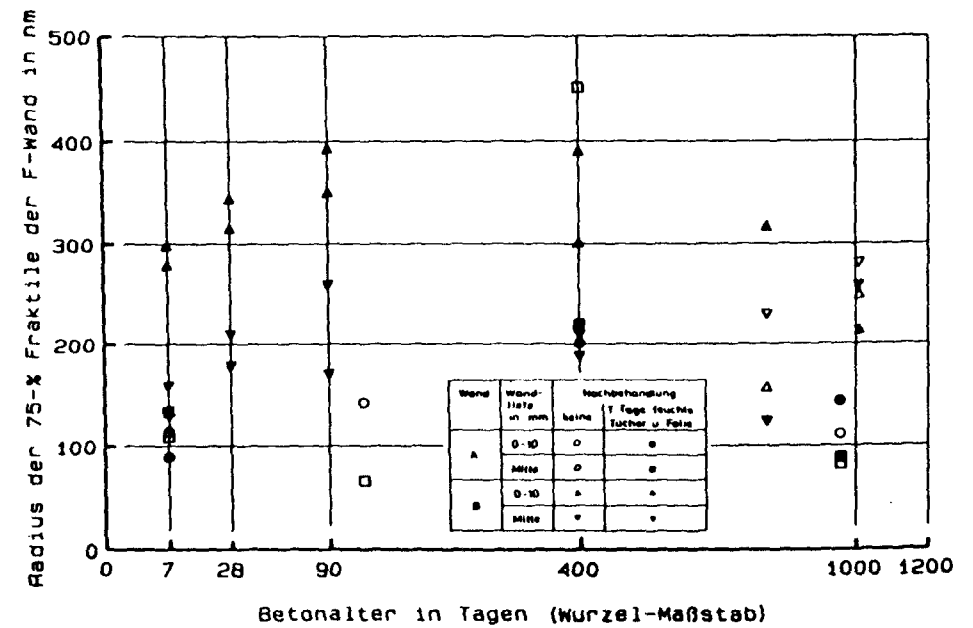
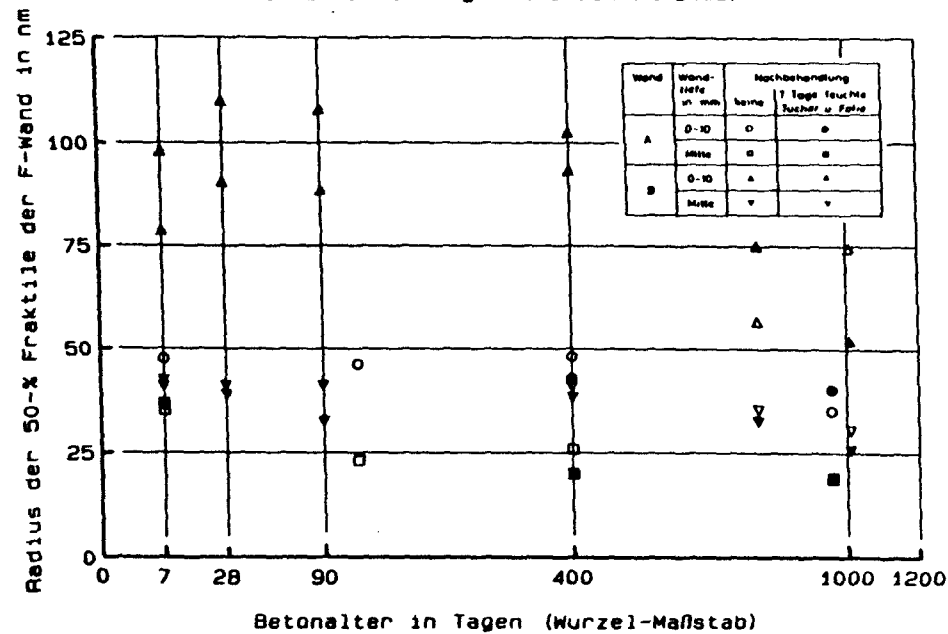
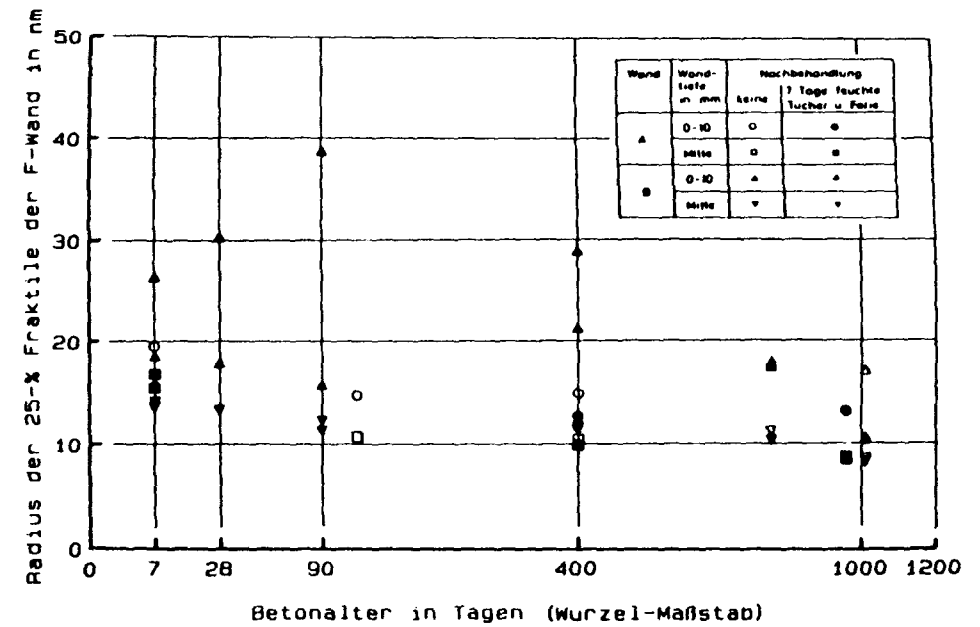
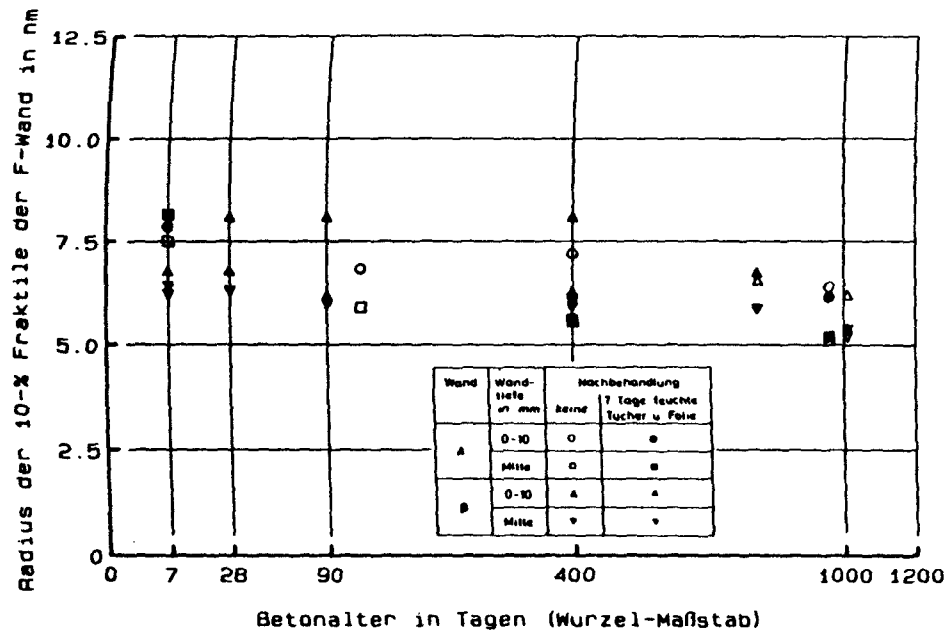


Bild D59

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktalradien für die im Freien aufgestellten Wände A und B getrennt nach Wandtiefe und Nachbehandlung.

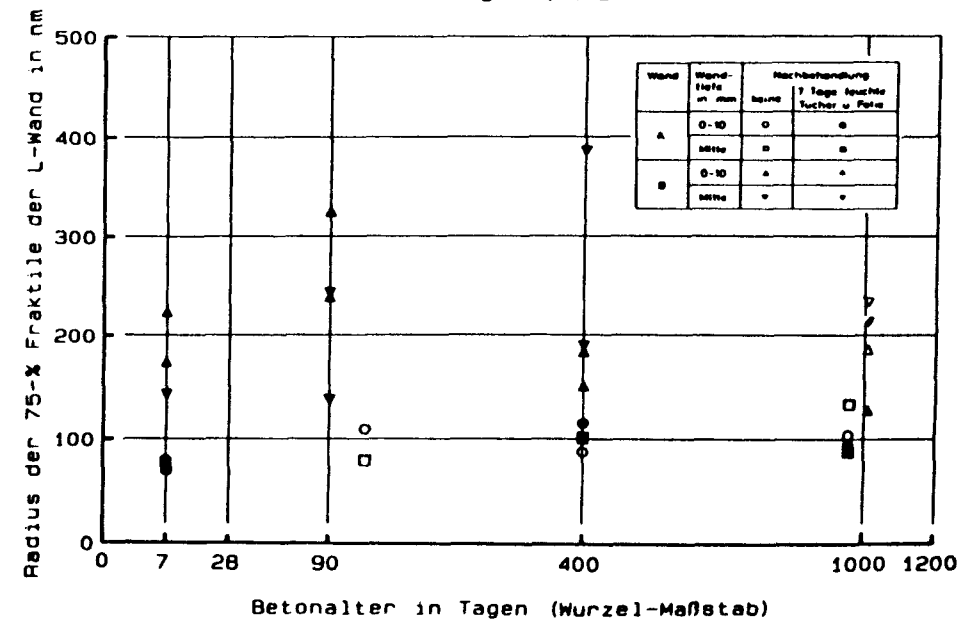
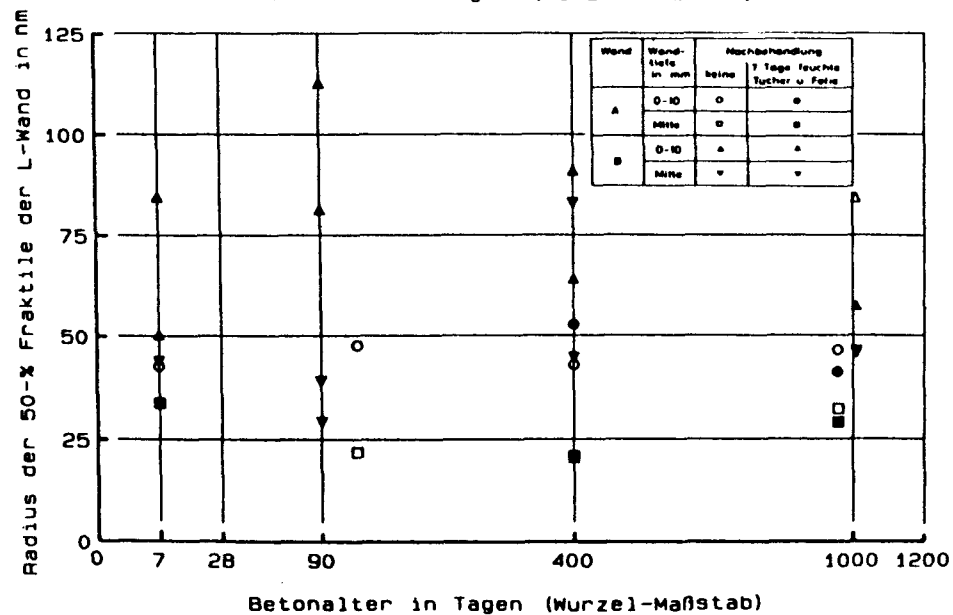
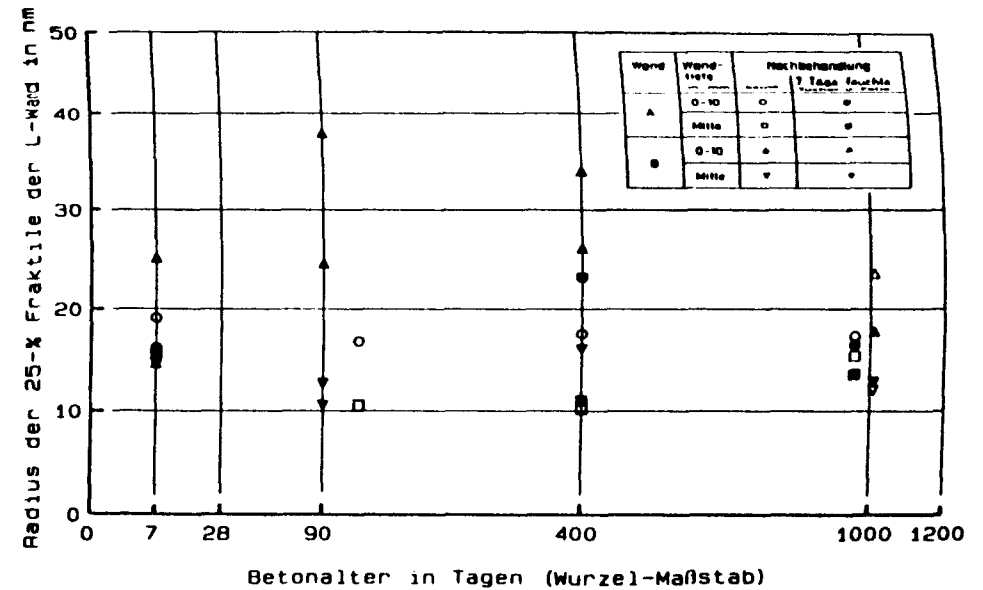
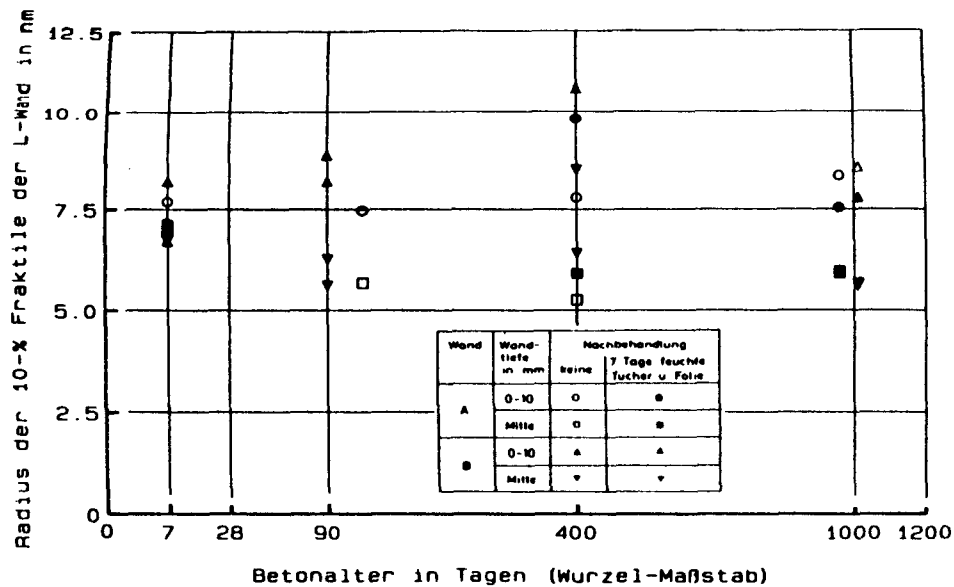


Bild D60

Zeitliche Entwicklung der einzelnen Fraktalradien für die im Labor aufgestellten Wände A und B getrennt nach Wandtiefe und Nachbehandlung.

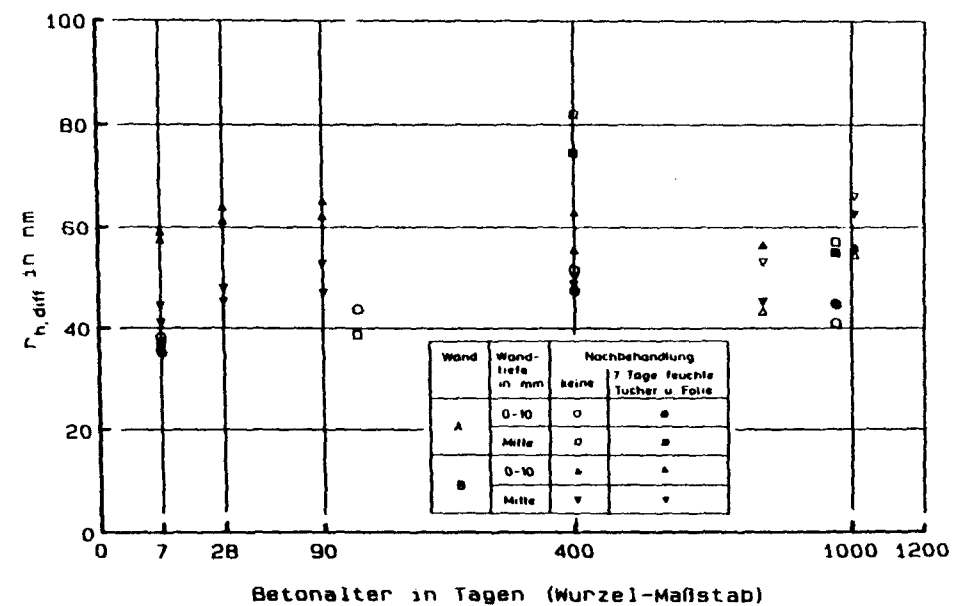
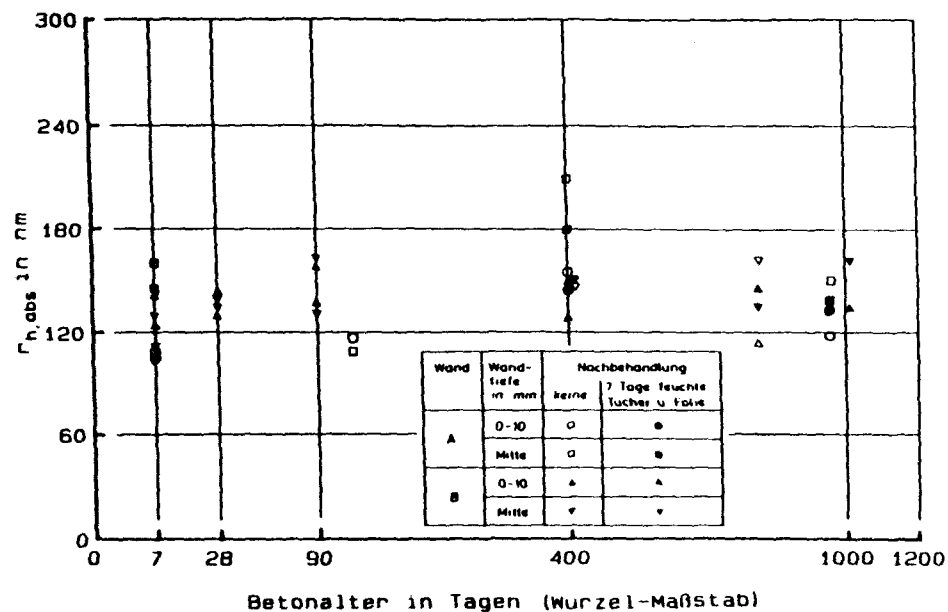
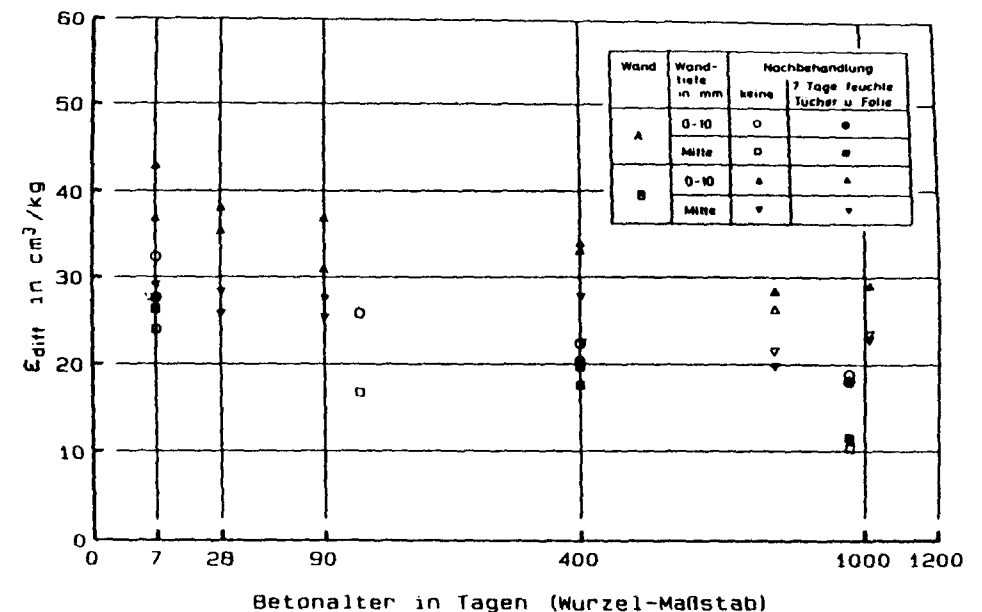
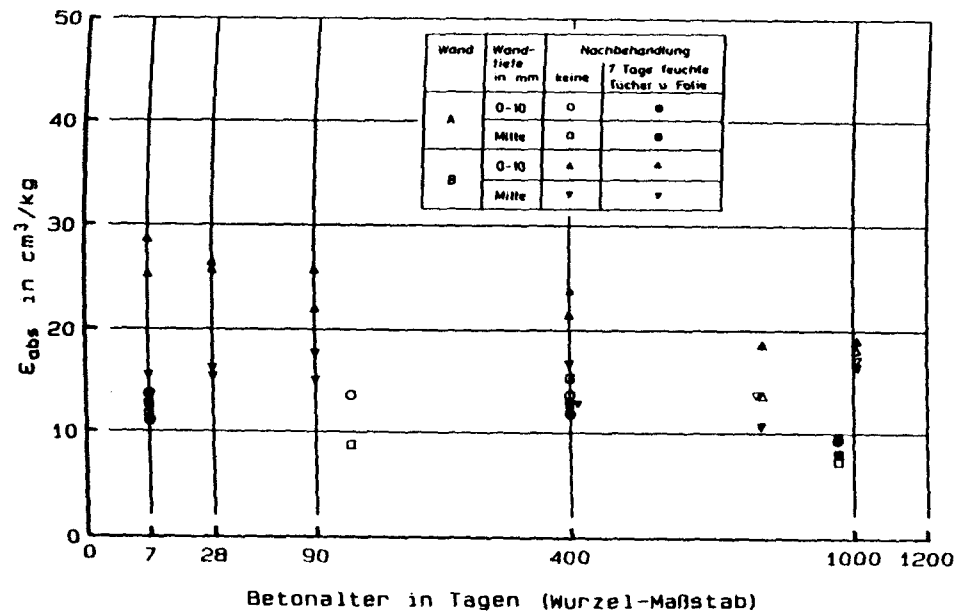


Bild D61

Zeitliche Entwicklung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung für die im Freien aufgestellten Wände A und B getrennt nach Wandtiefe und Nachbehandlung.

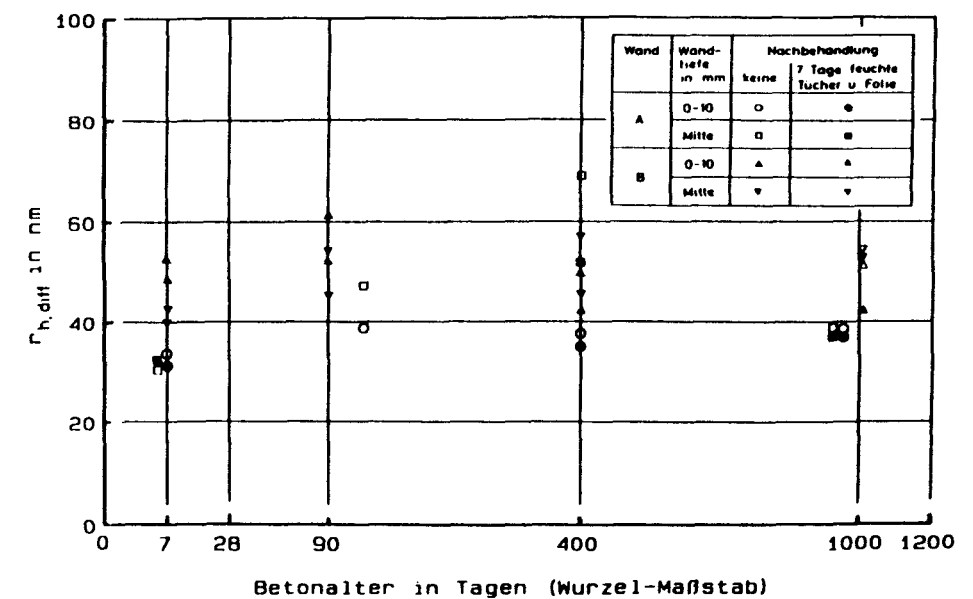
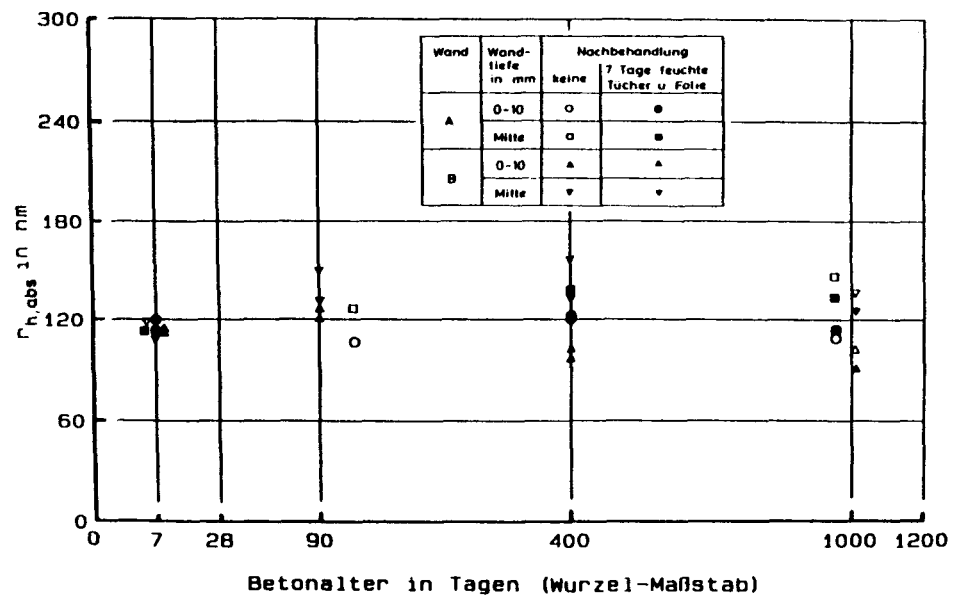
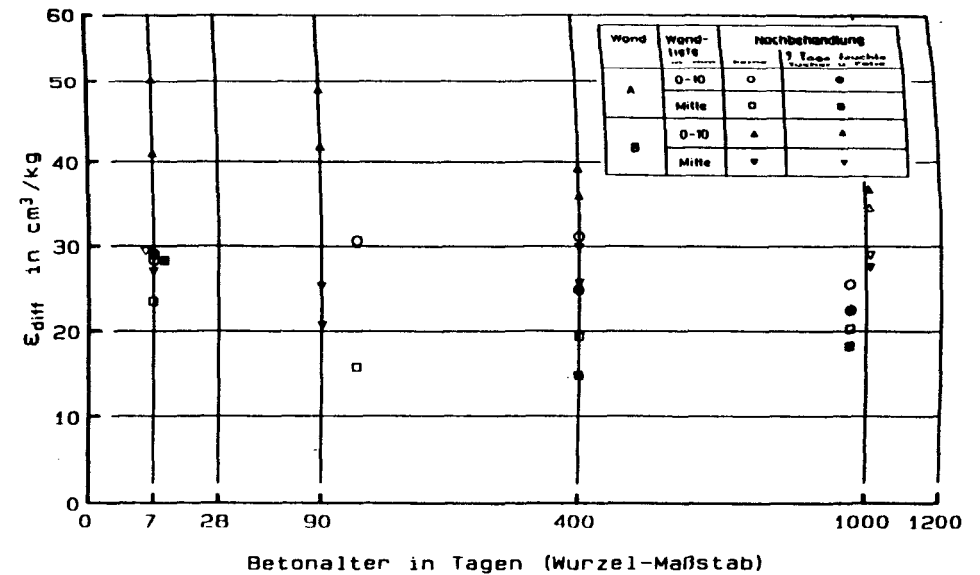
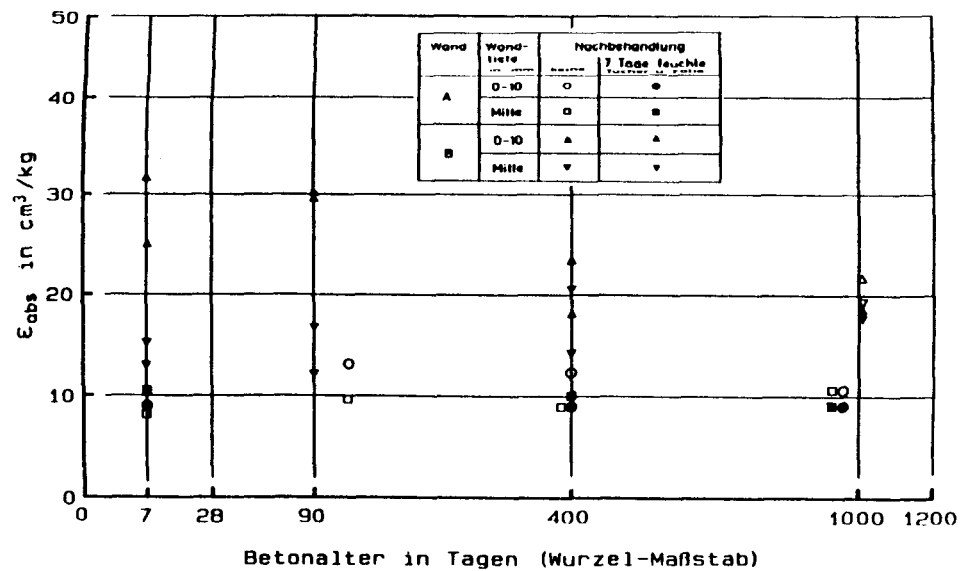


Bild D62

Zeitliche Entwicklung der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung für die im Labor aufgestellten Wände A und B getrennt nach Wandtiefe und Nachbehandlung.

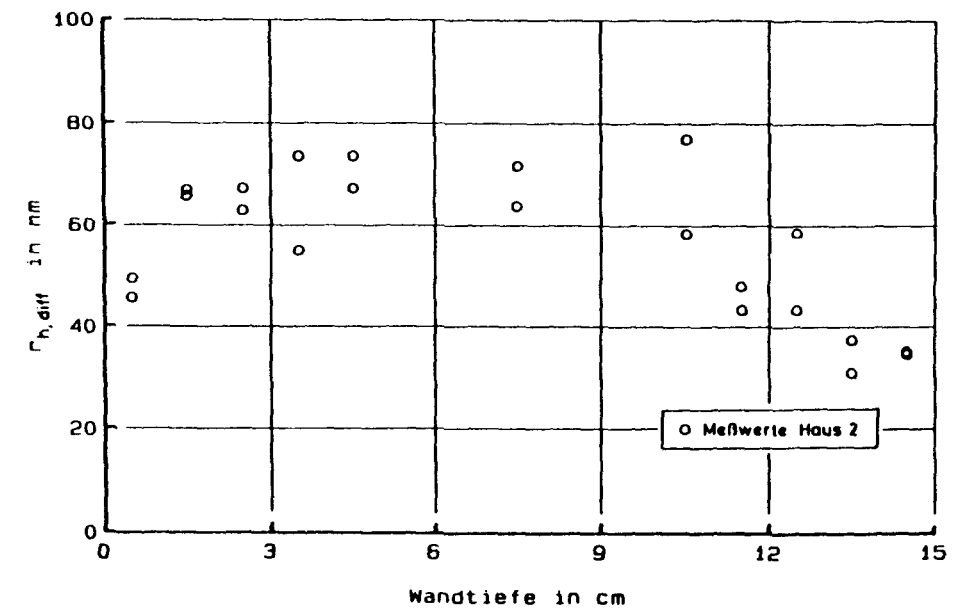
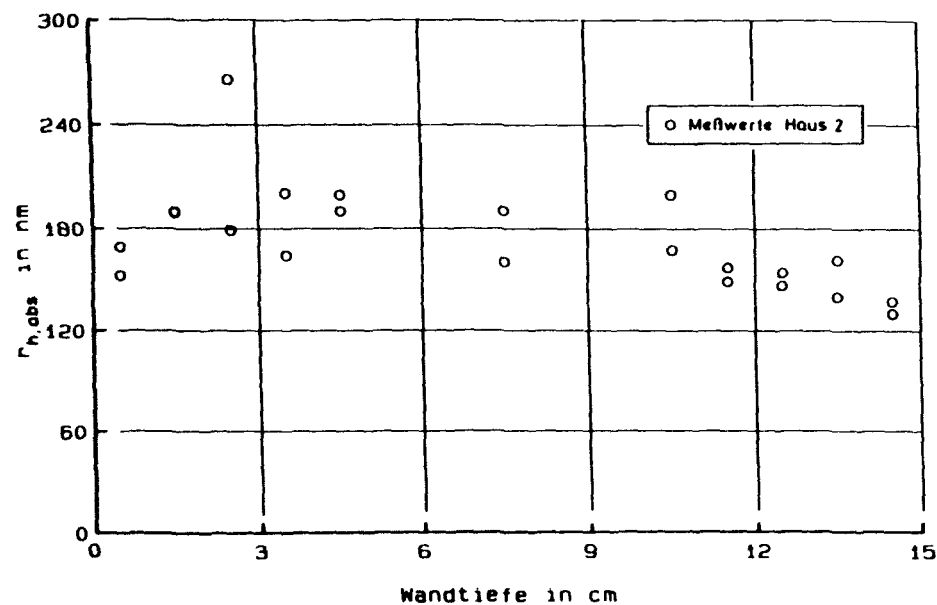
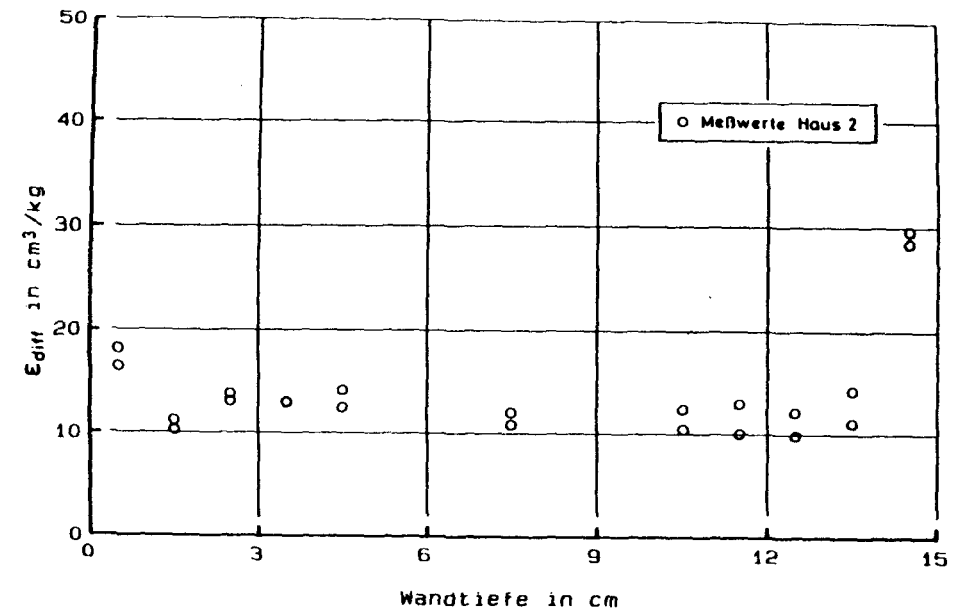
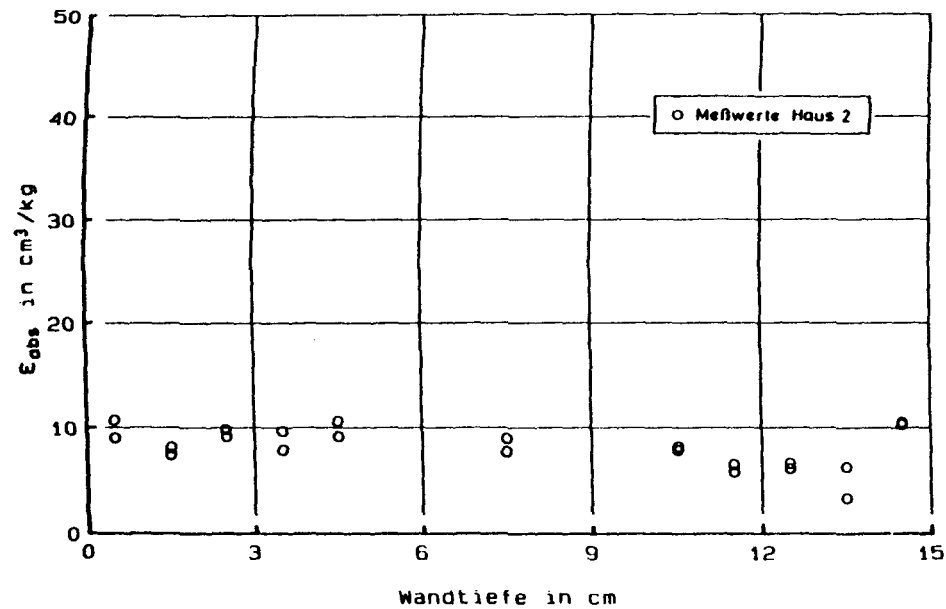


Bild D63

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe für das Versuchshaus 2 aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

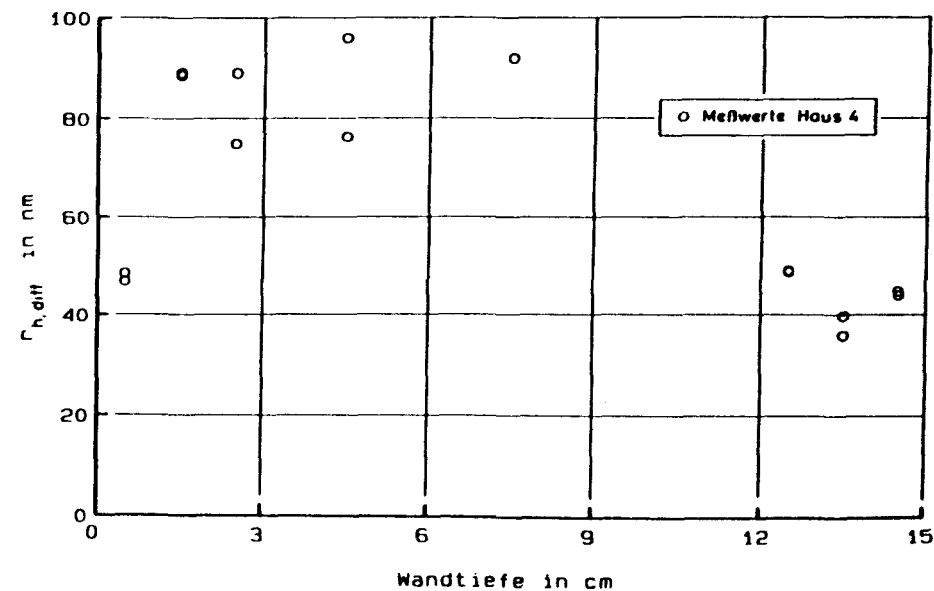
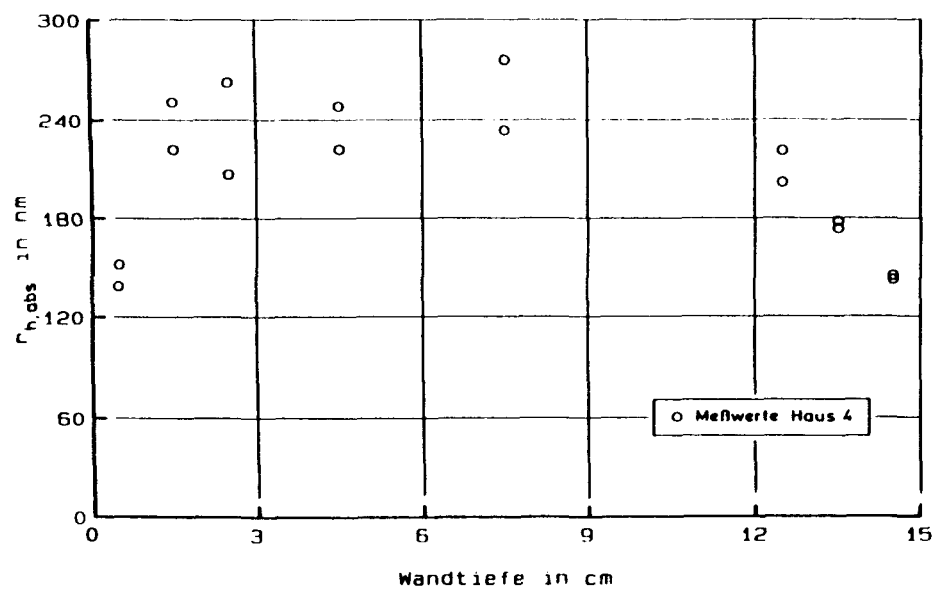
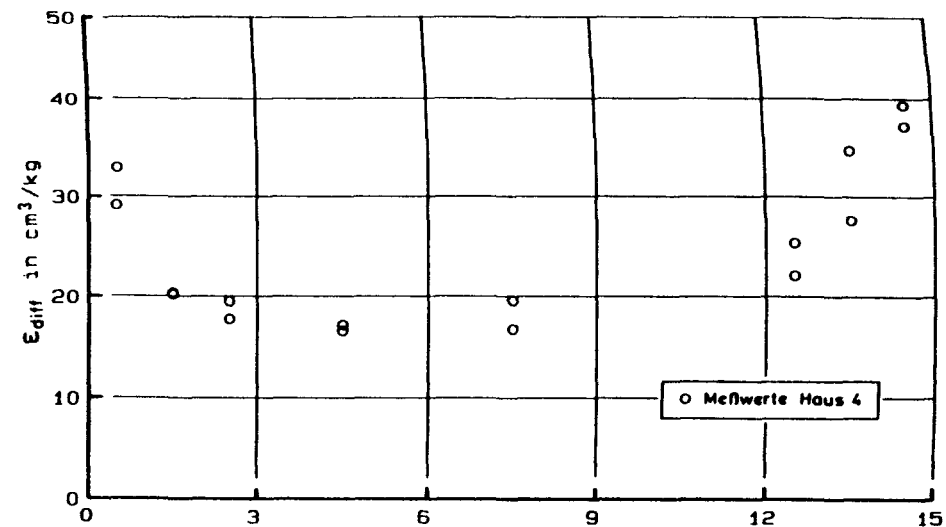
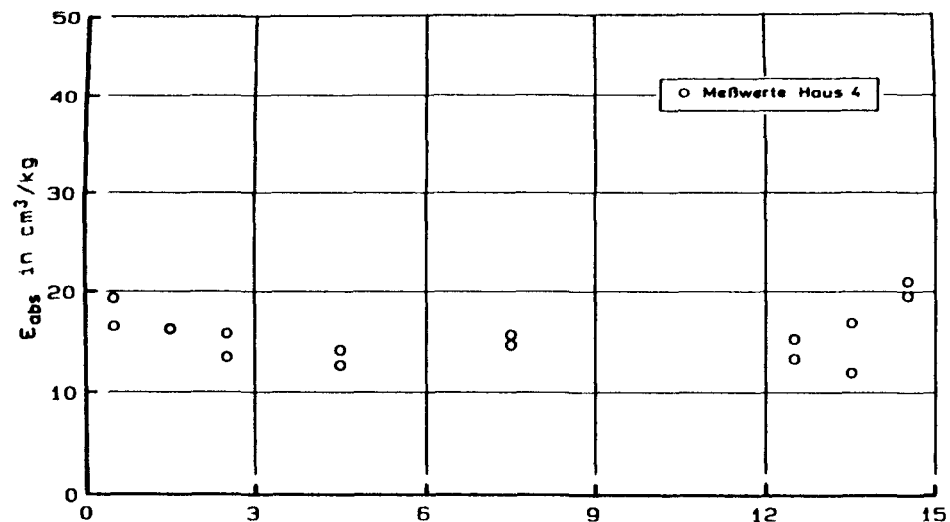


Bild D64

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe für das Versuchshaus 4 aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

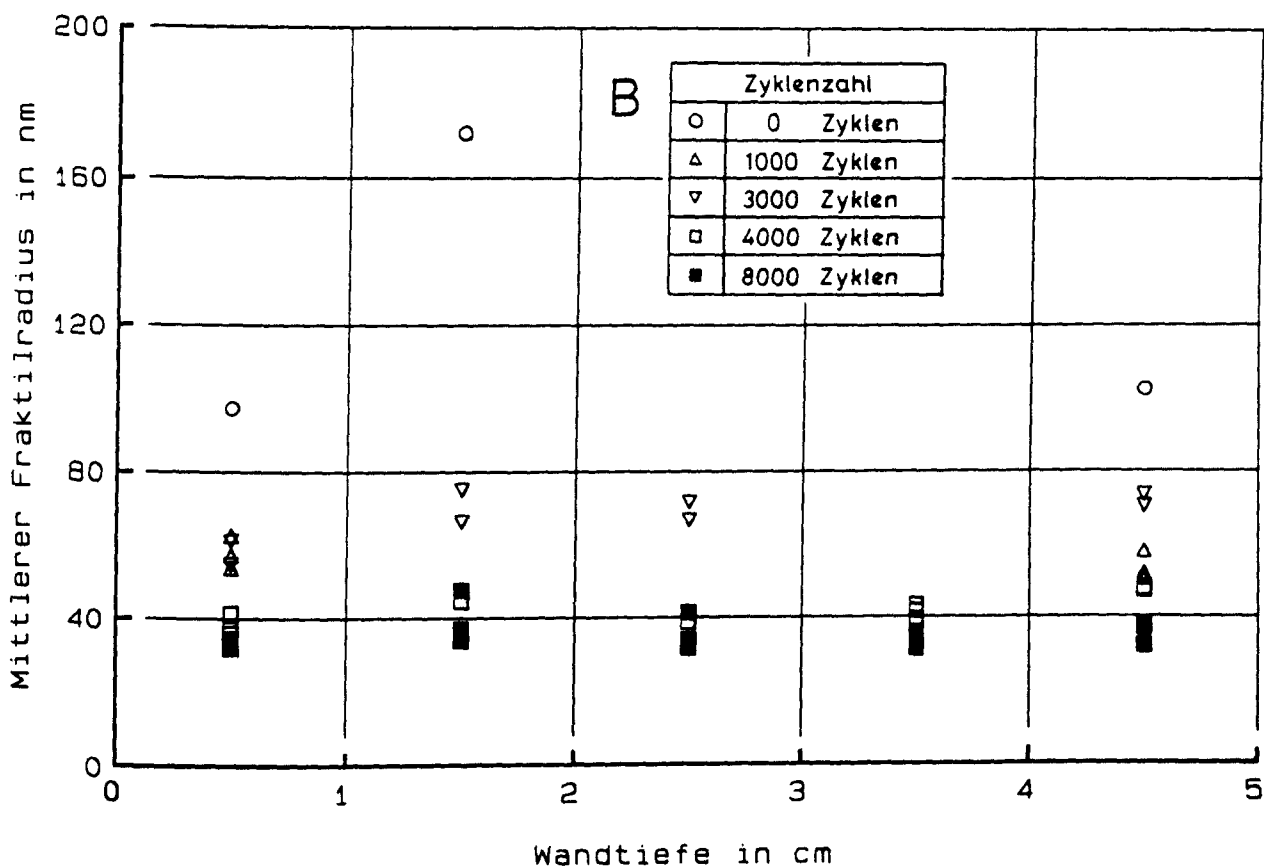
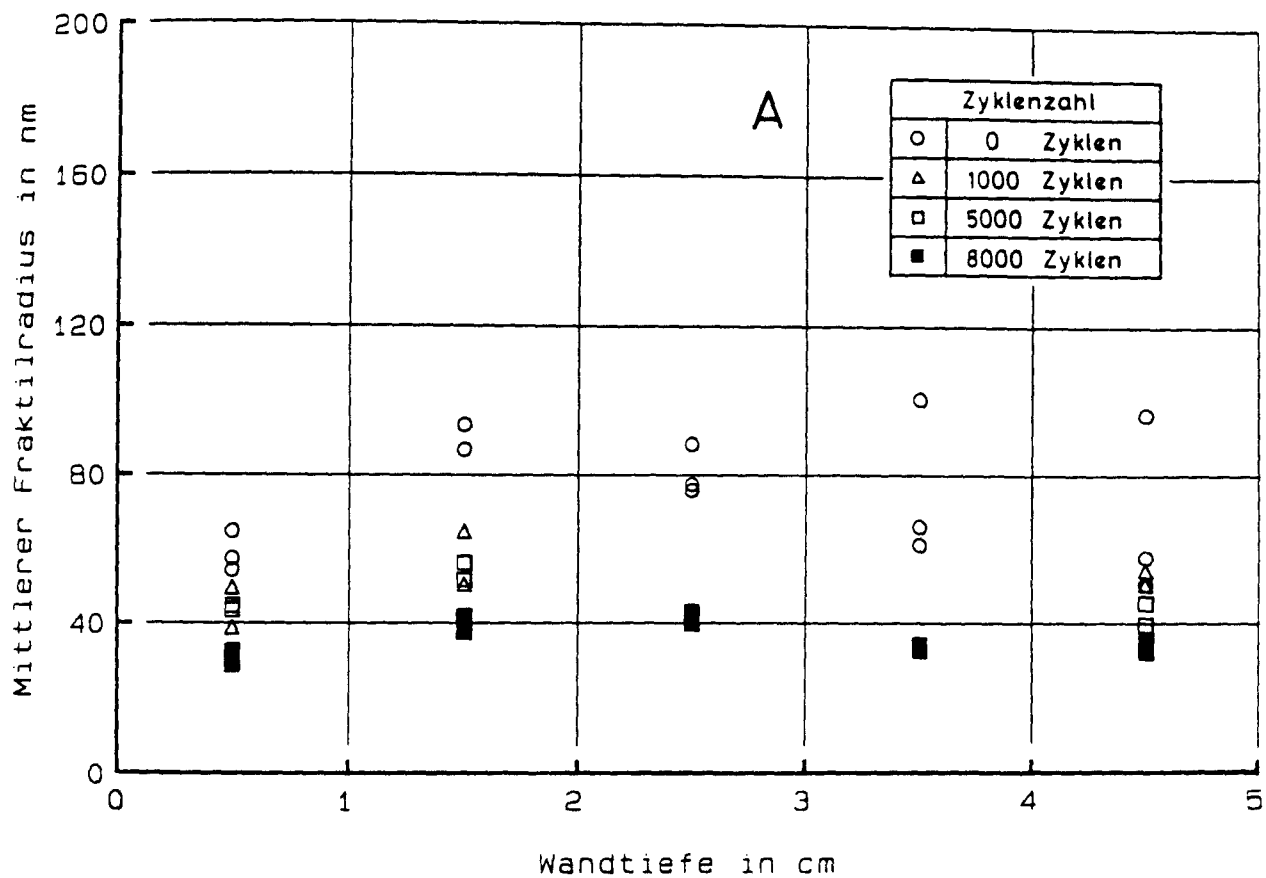


Bild D65

Abhängigkeit des mittleren Fraktalradius r_g von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand A (obere Bildhälfte) und Wand B (untere Bildhälfte) getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

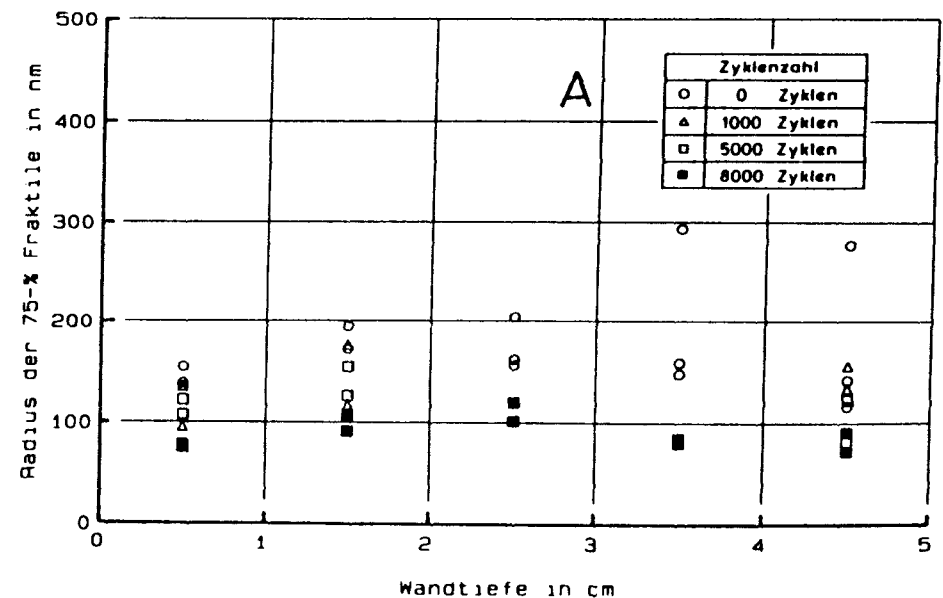
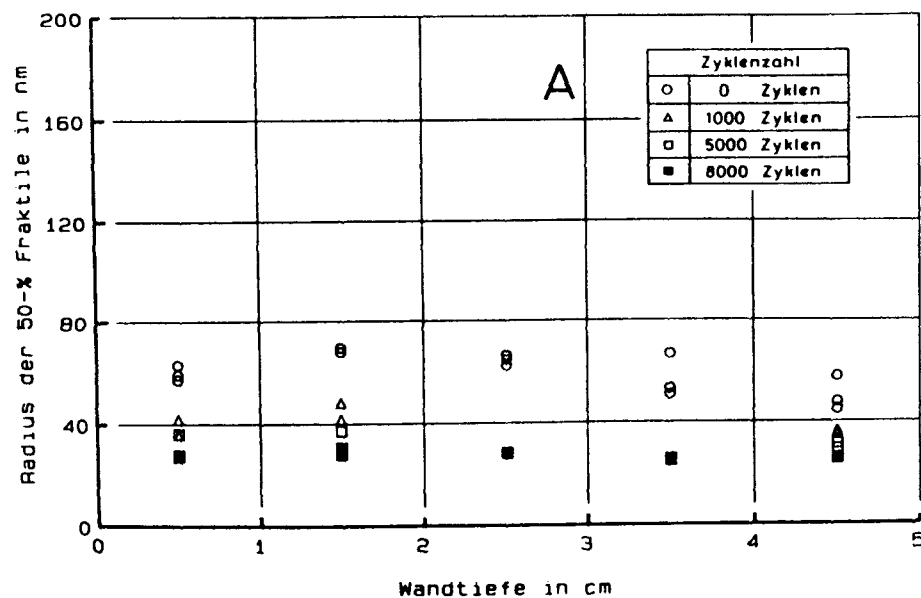
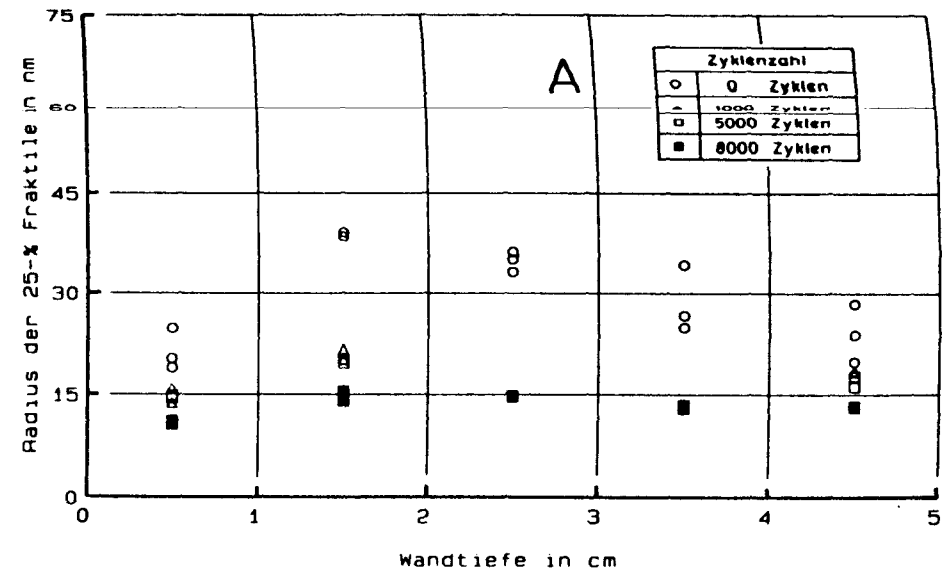
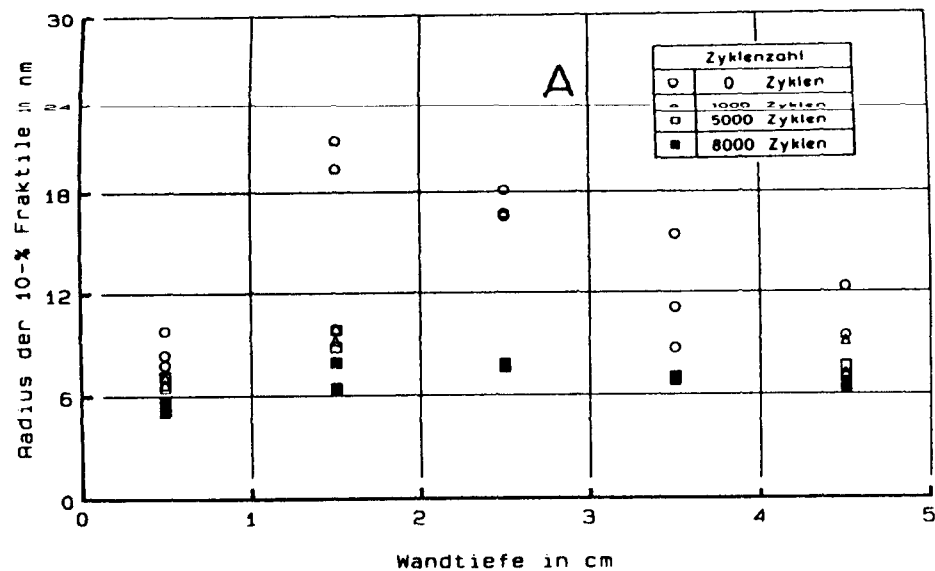


Bild D66

Abhängigkeit der einzelnen Fraktilradien von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand A getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

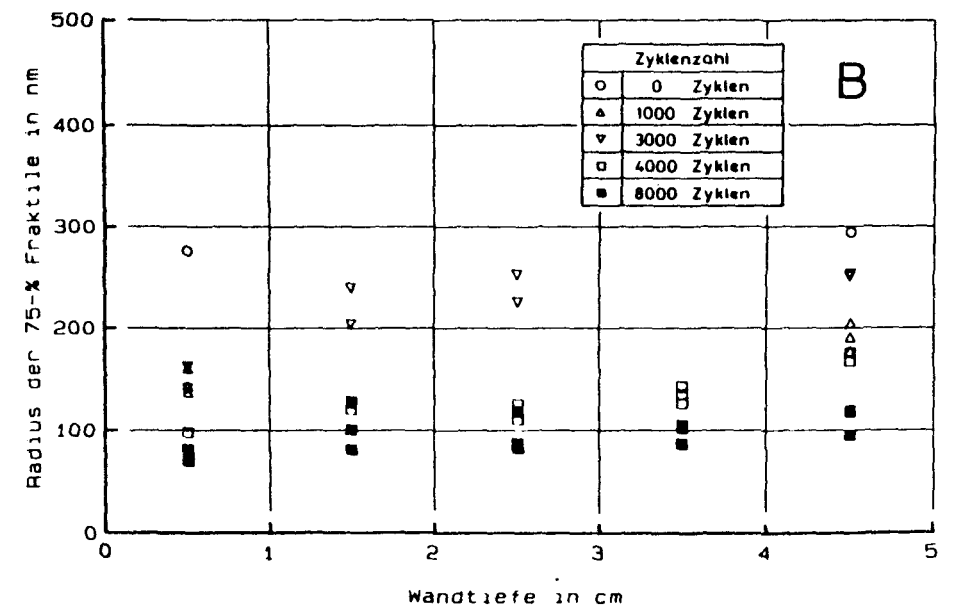
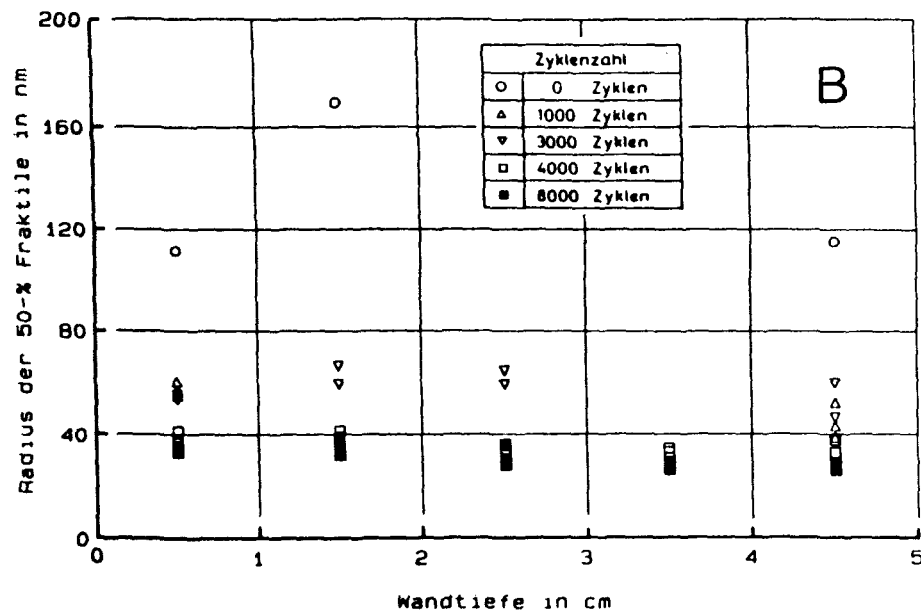
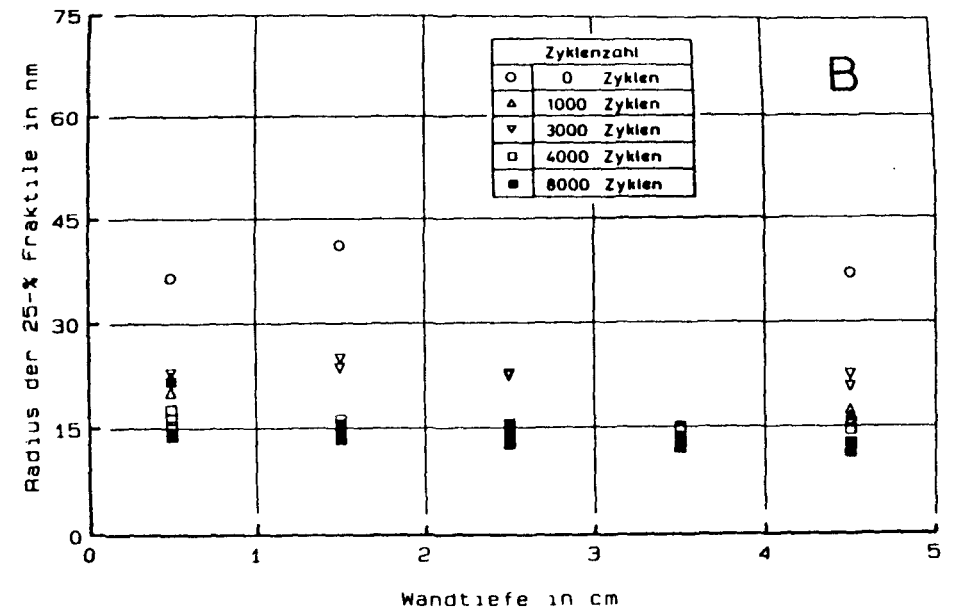
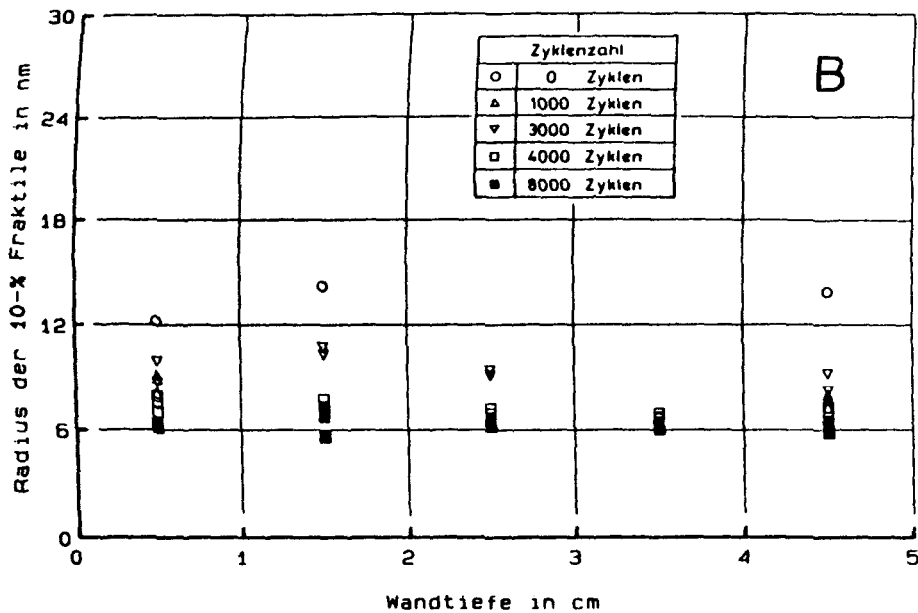


Bild D67

Abhängigkeit der einzelnen Fraktilradien von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand B getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

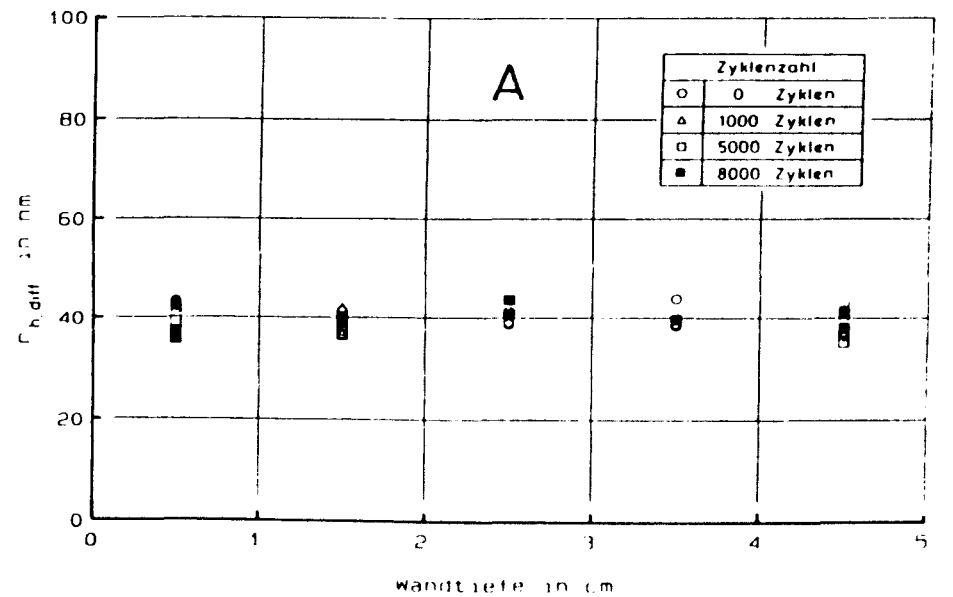
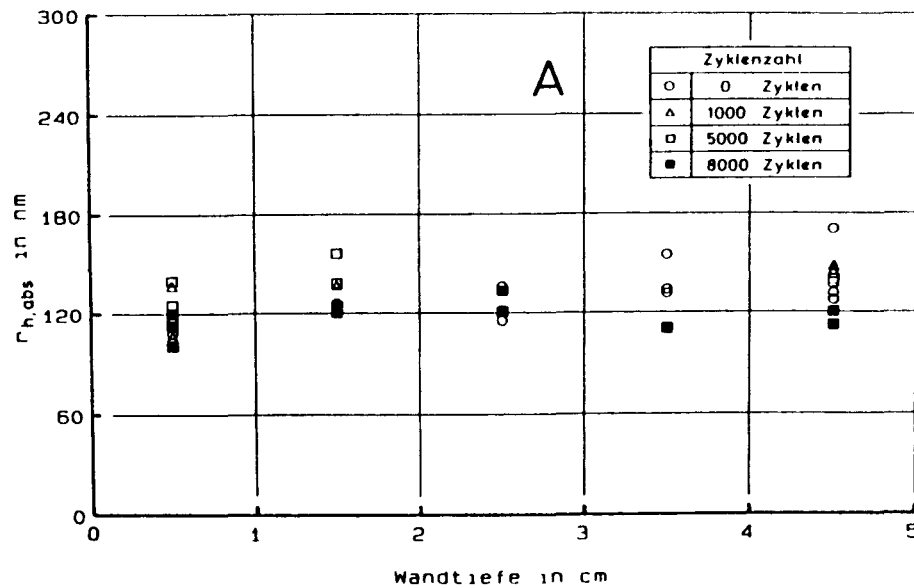
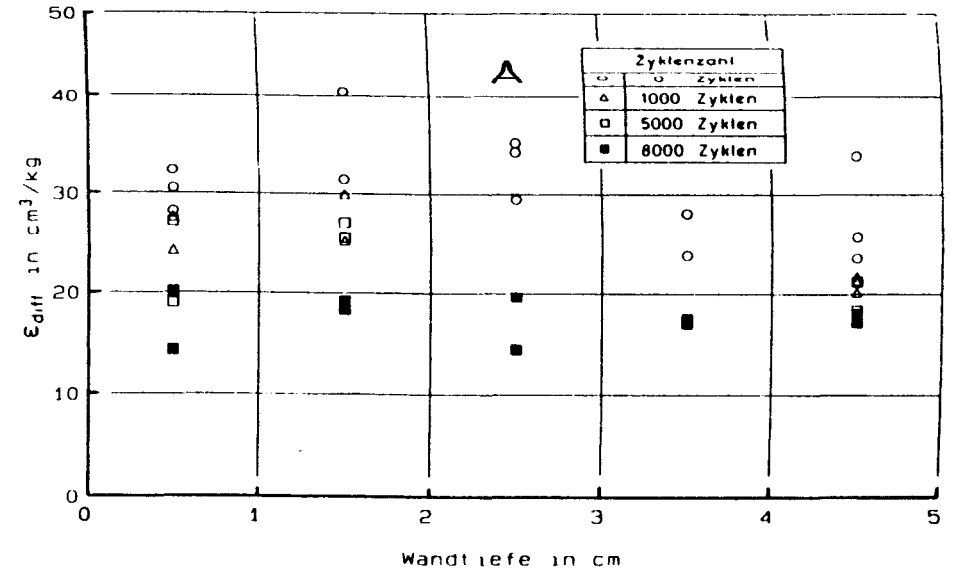
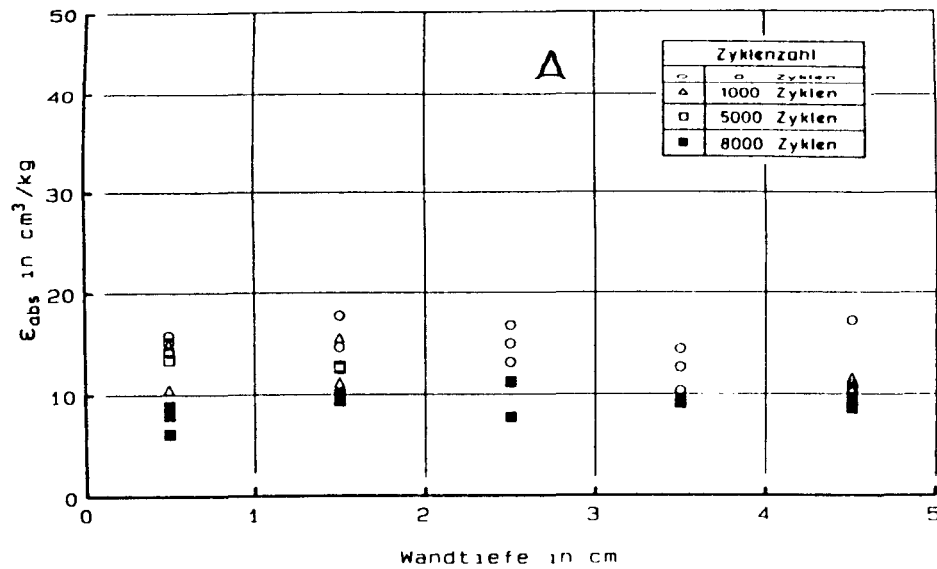


Bild D68

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradialverteilung von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand A getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

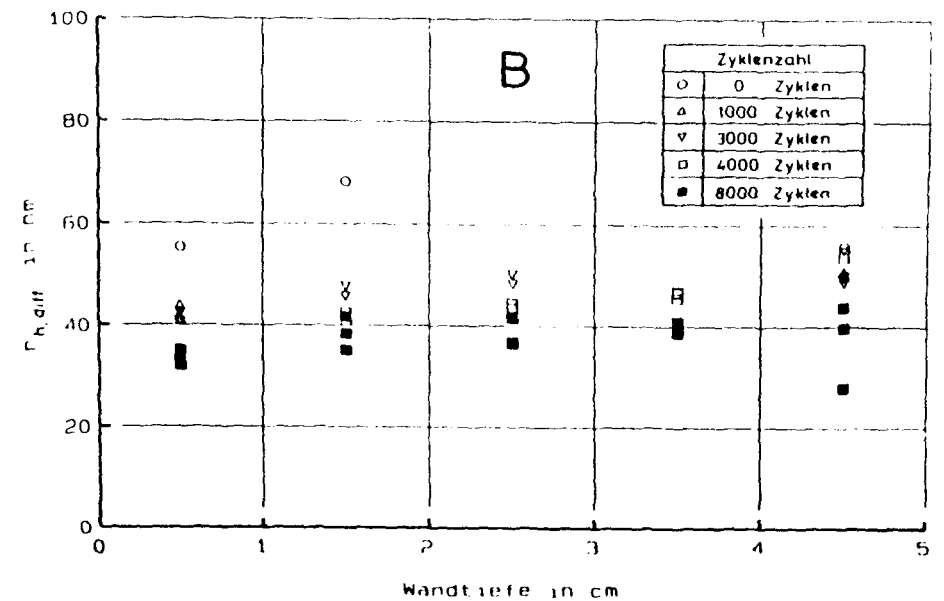
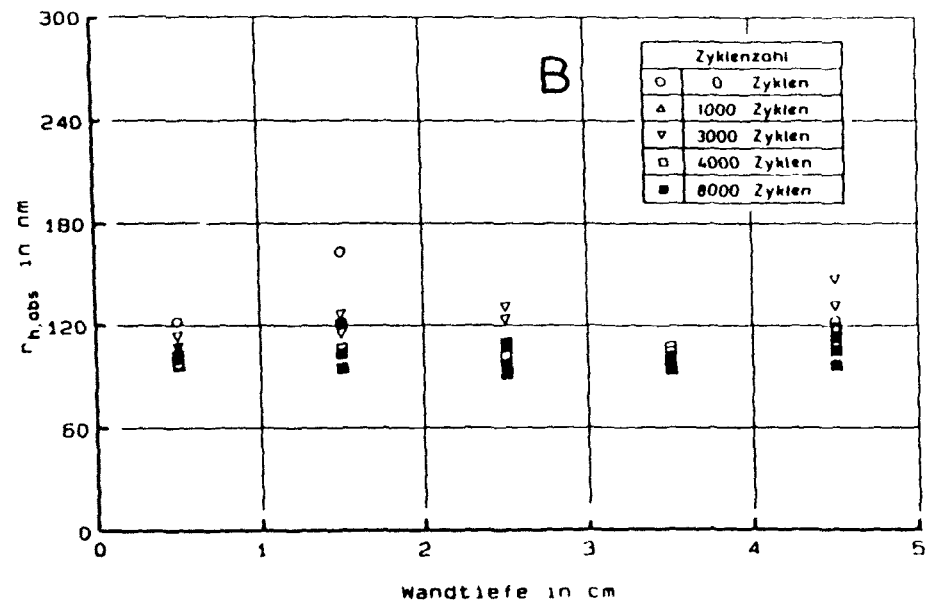
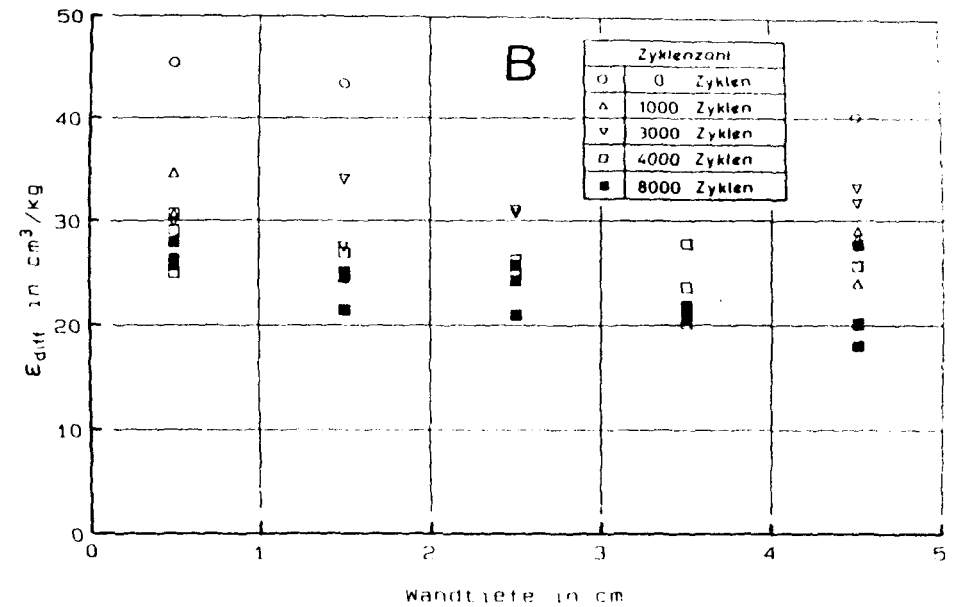
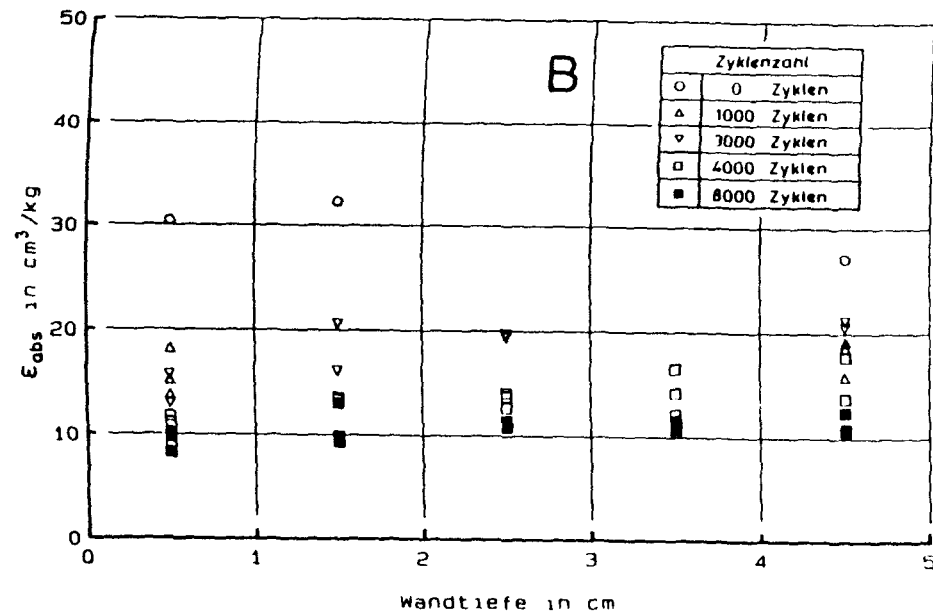


Bild D69

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand B getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

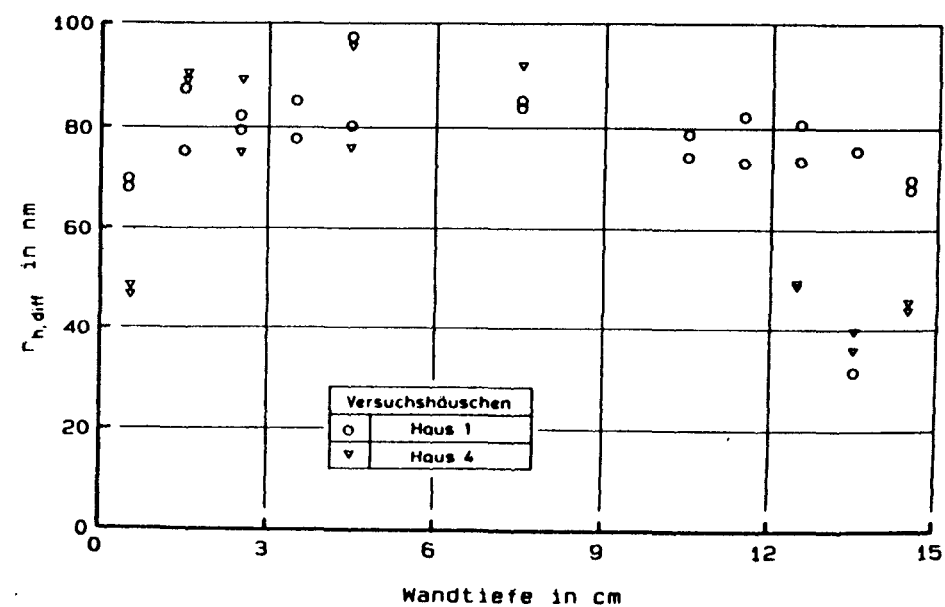
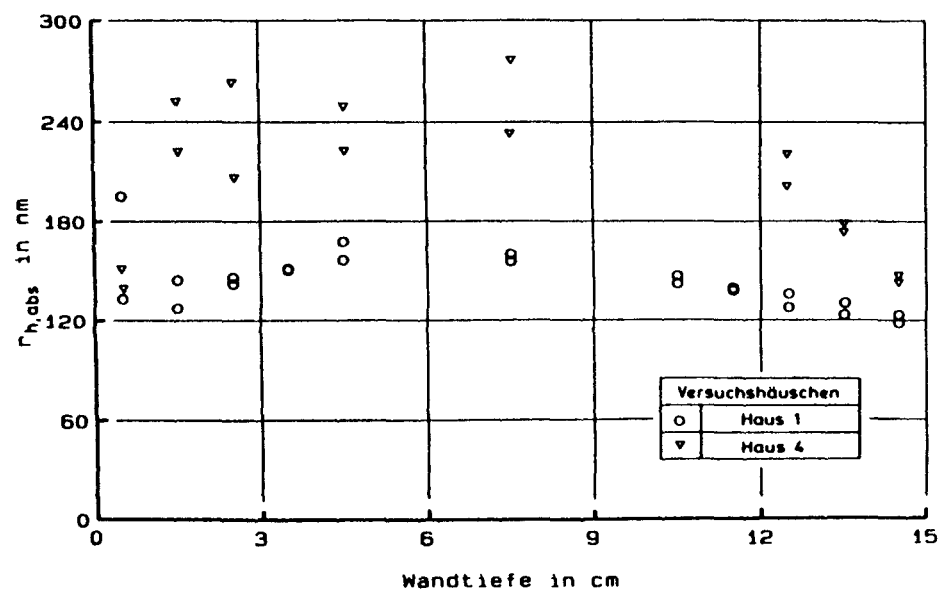
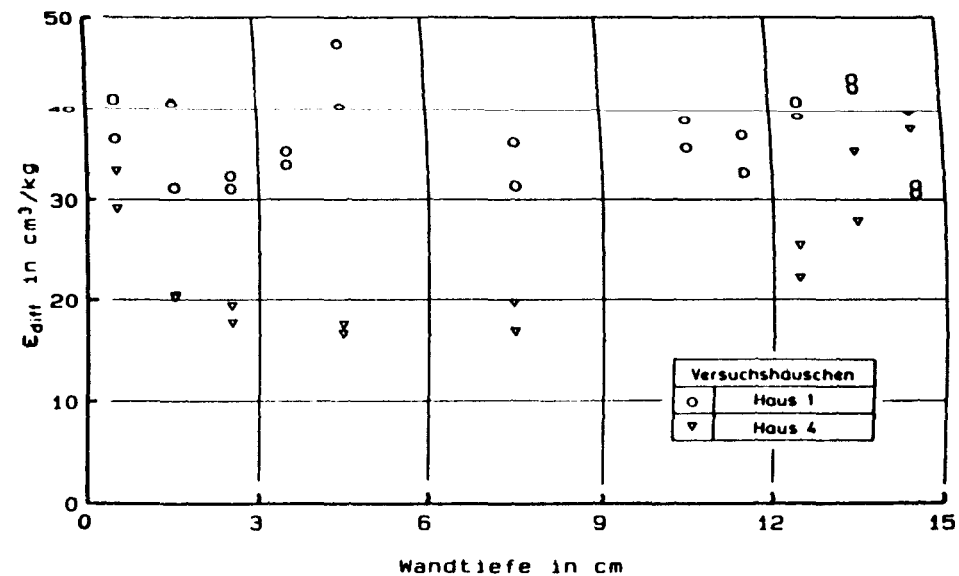
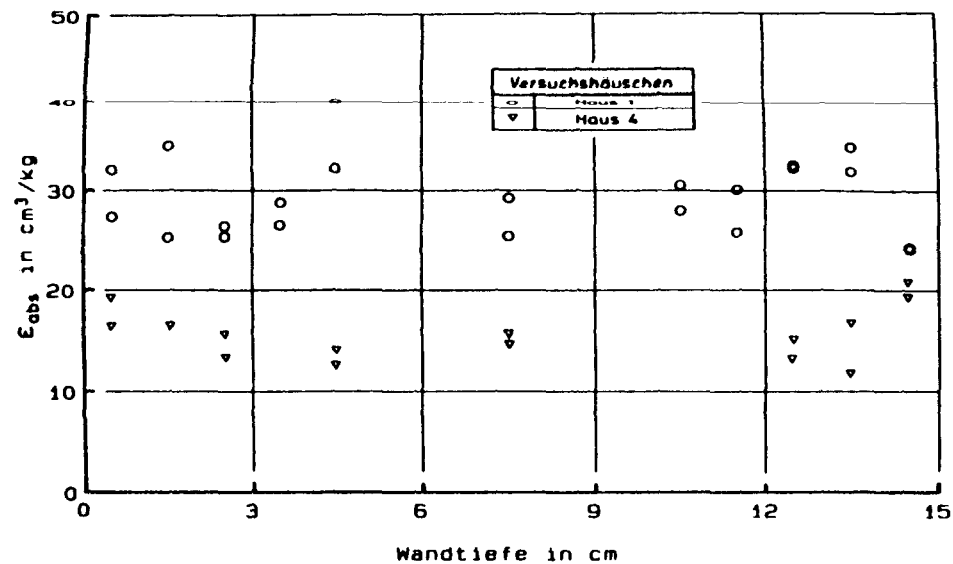


Bild D70

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe der Versuchshäuser 1 (PZ Beton) und 4 (HOZ Beton) aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

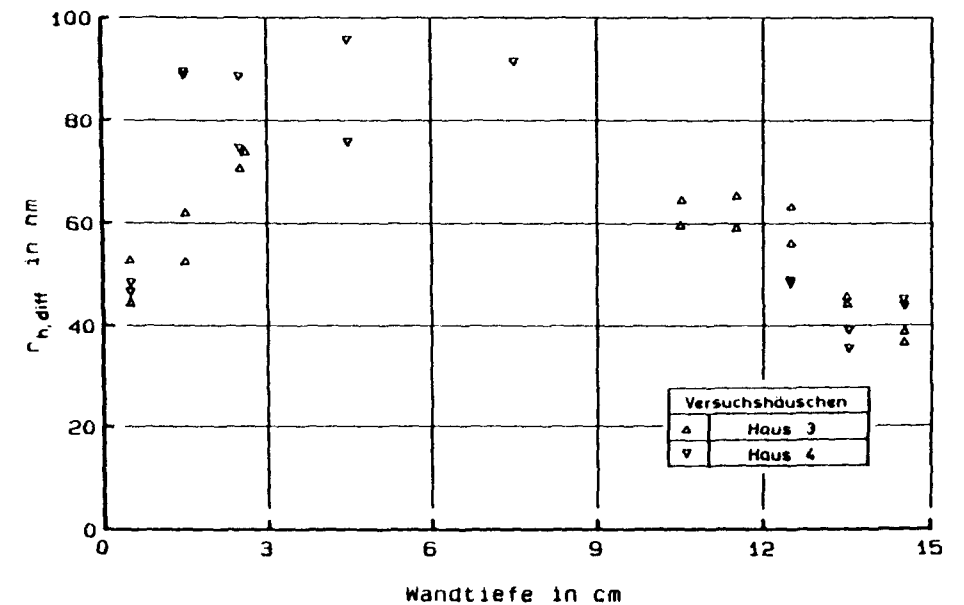
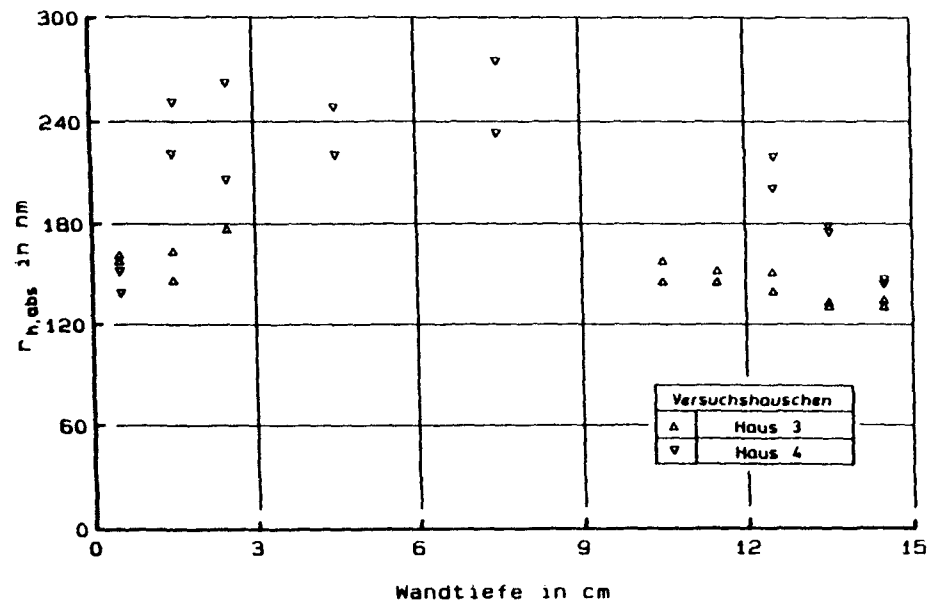
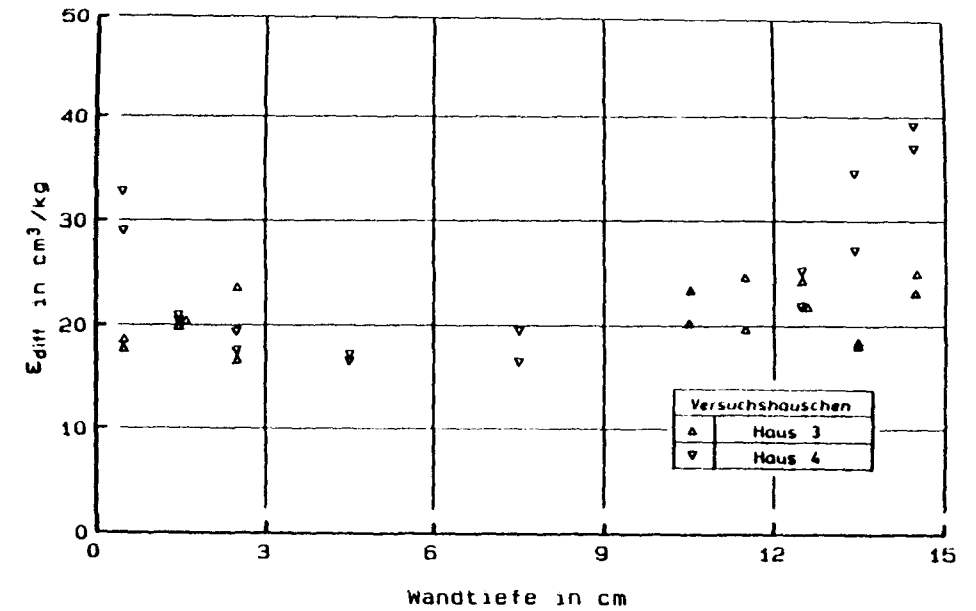
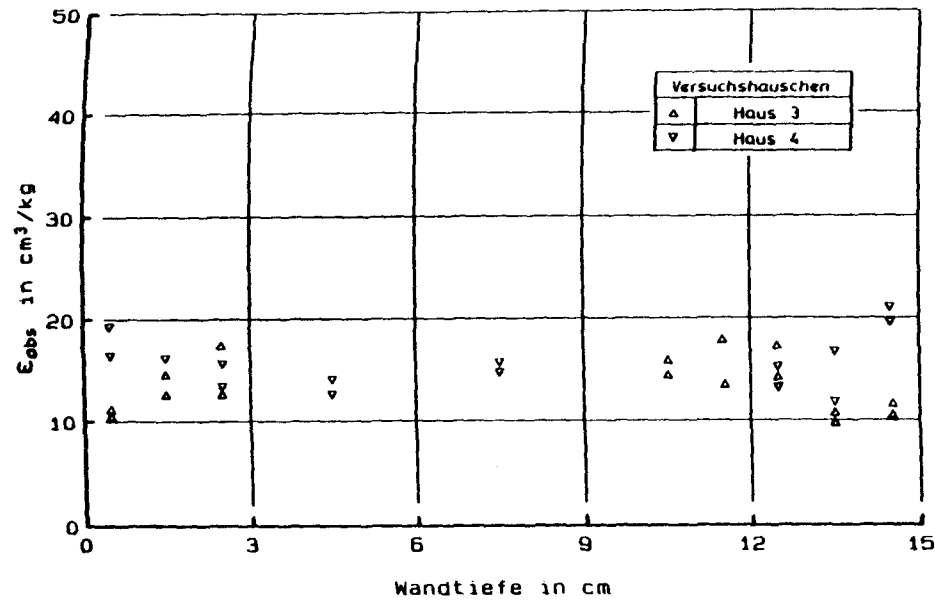


Bild D71

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe der Versuchshäuser 3 (HOZ 375) und 4 (HOZ 275) aus Beckum (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm).

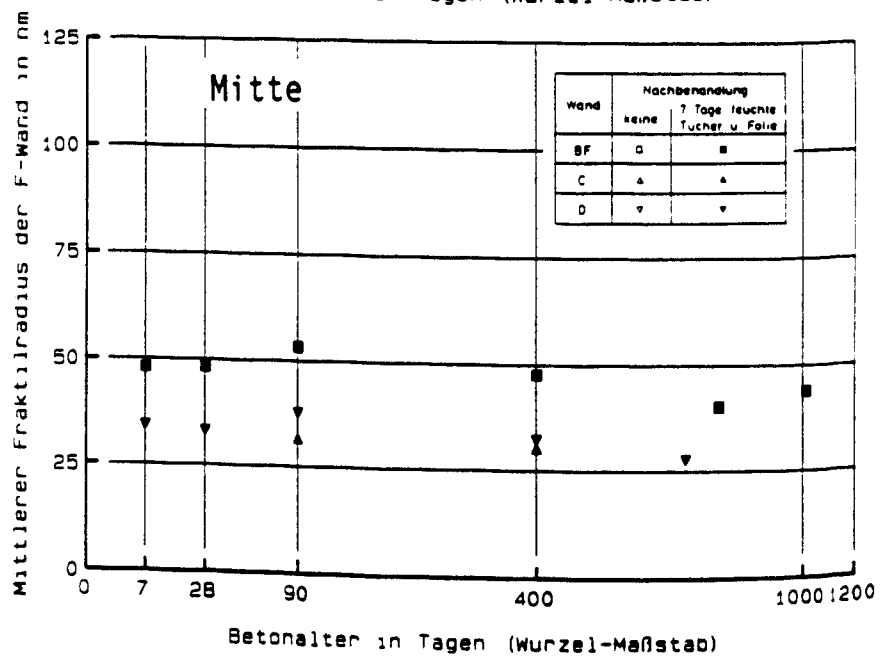
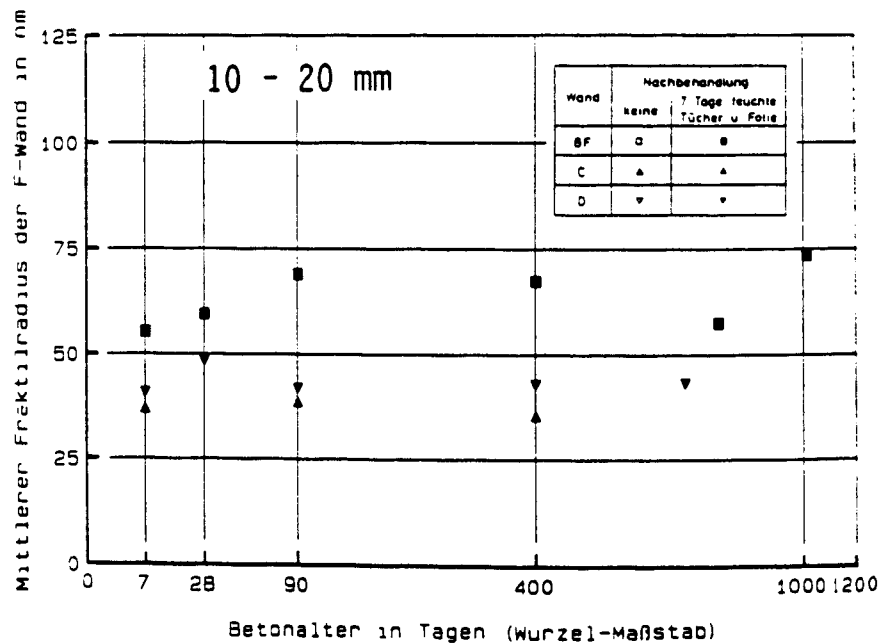
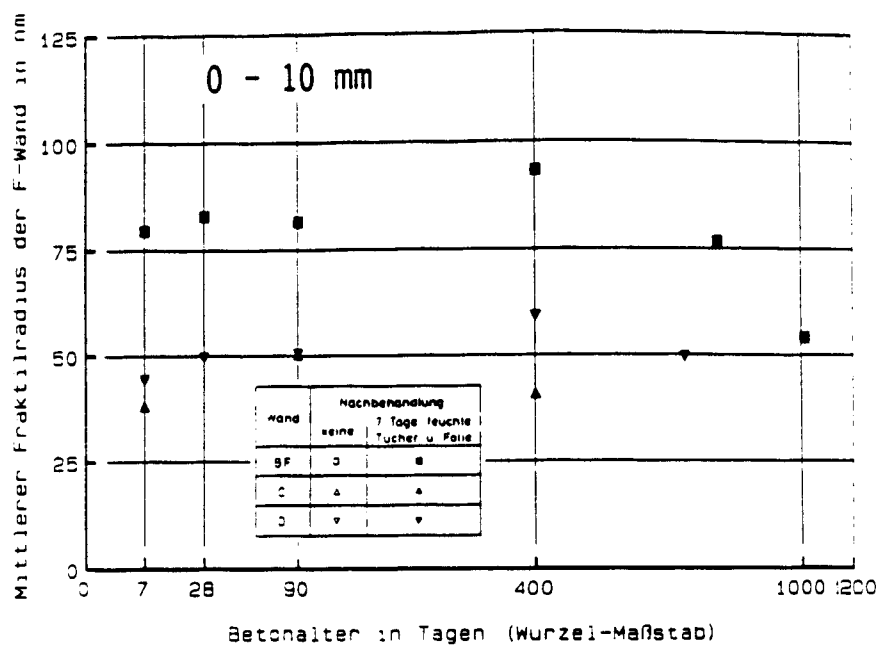


Bild D72

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius r_g für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

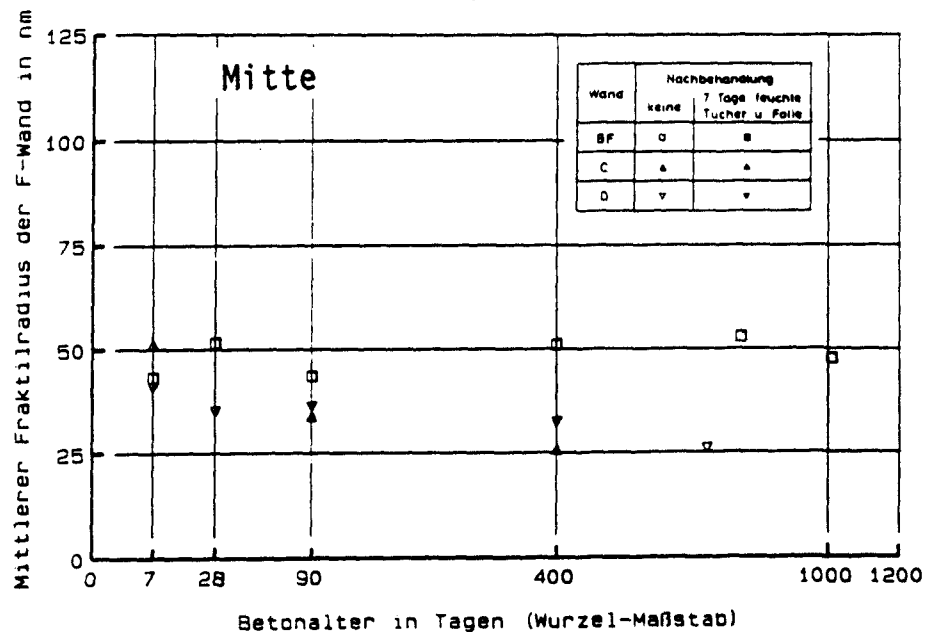
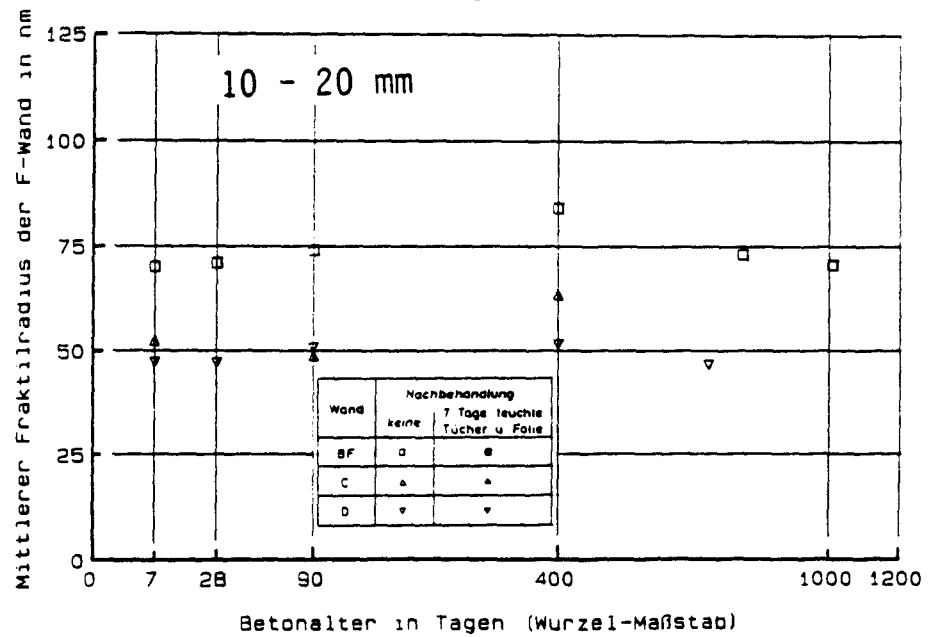
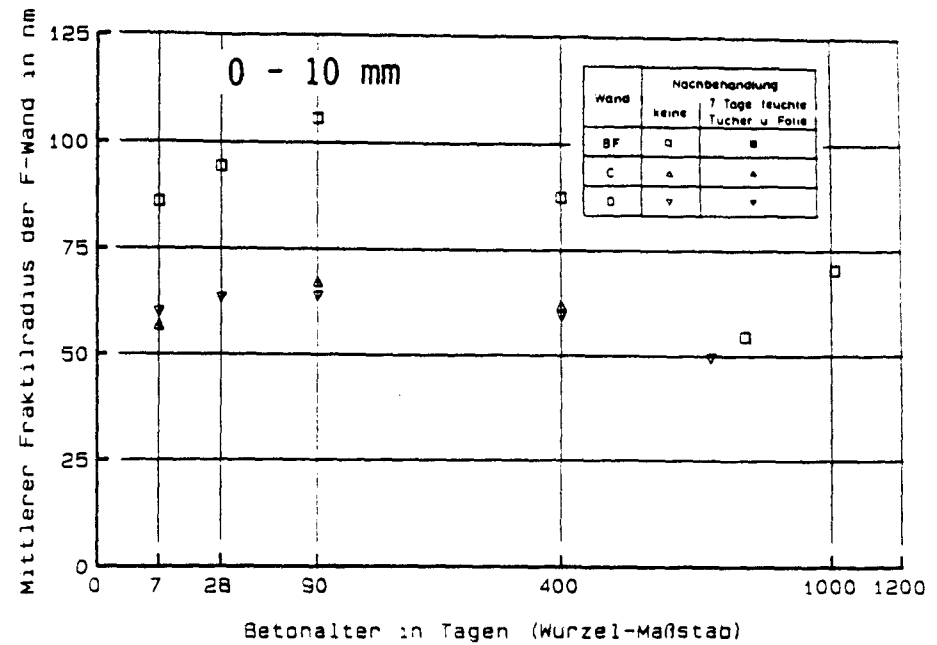


Bild D73

Zeitliche Entwicklung des mittleren Fraktalradius r_g für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

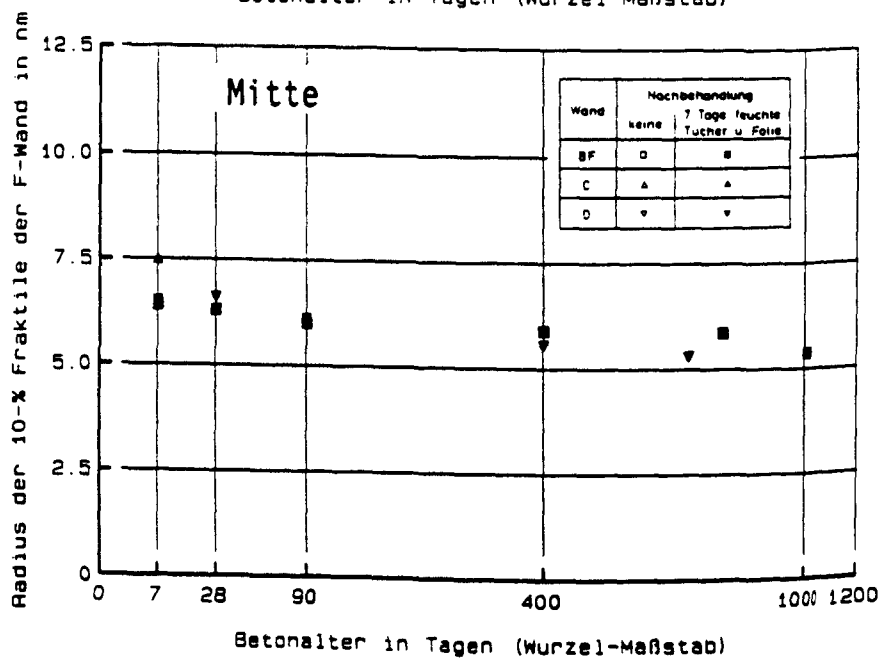
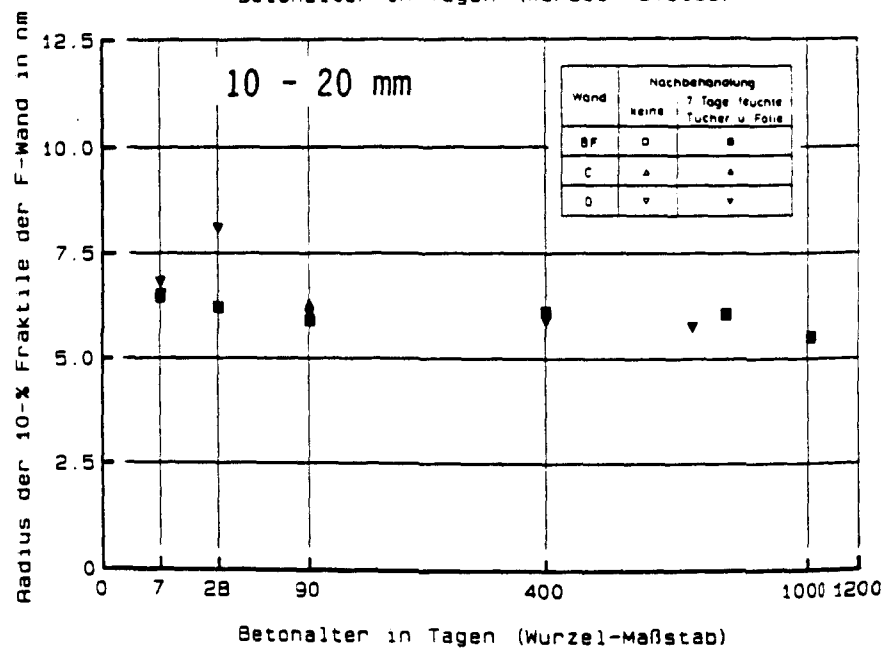
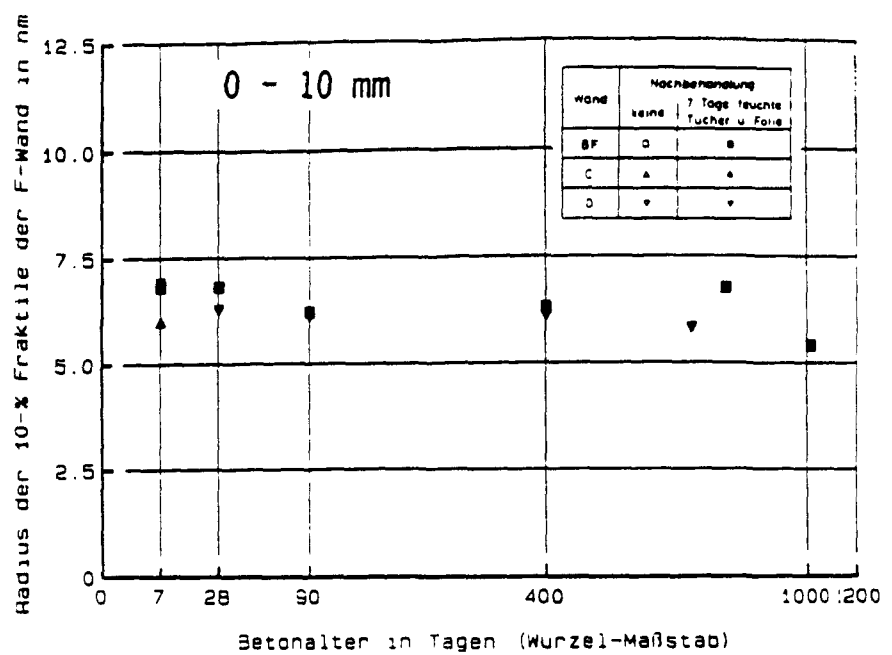


Bild D74

Zeitliche Entwicklung des Fraktalradius $r_{0,10}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

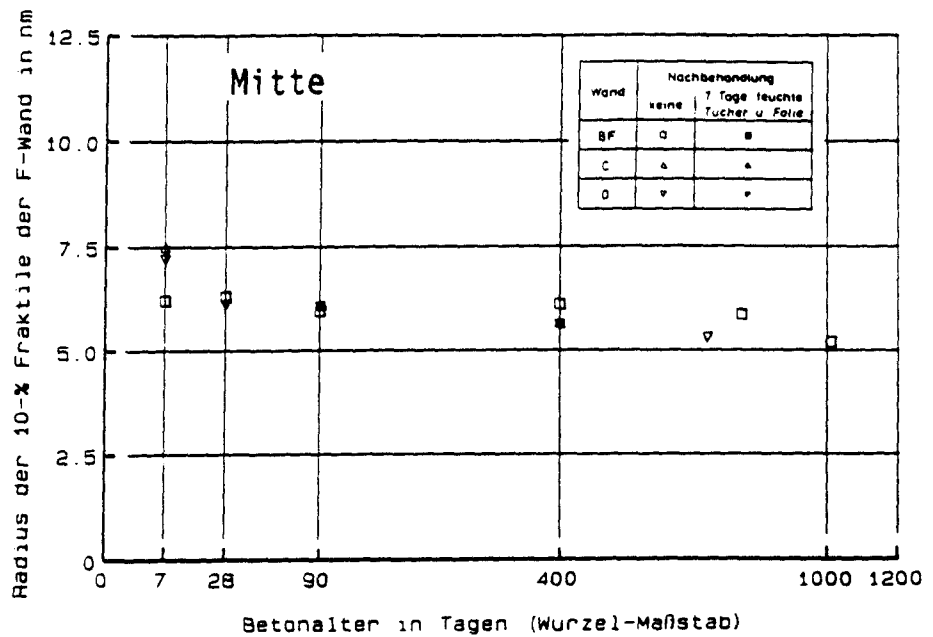
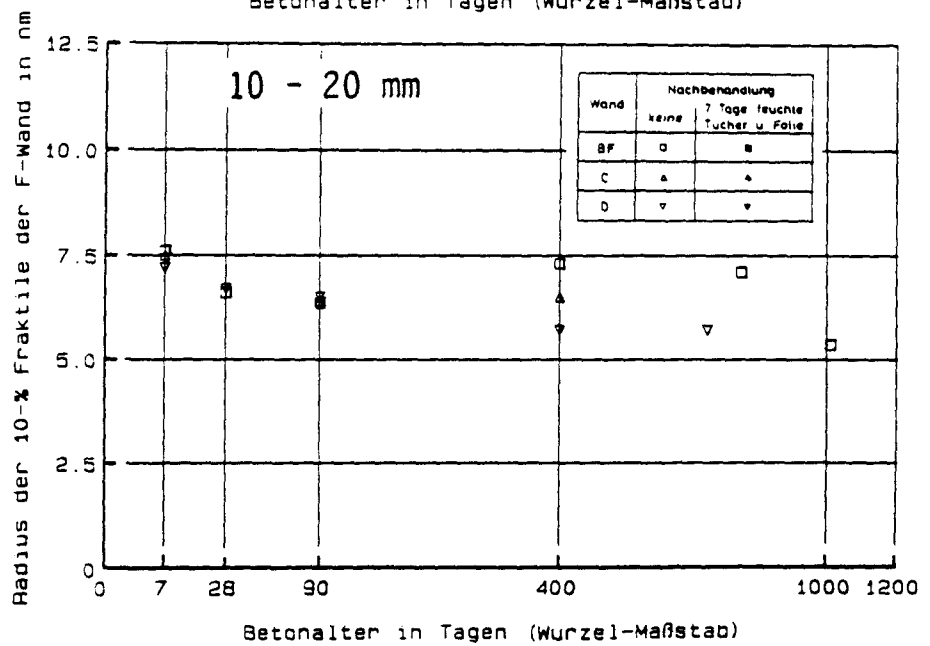
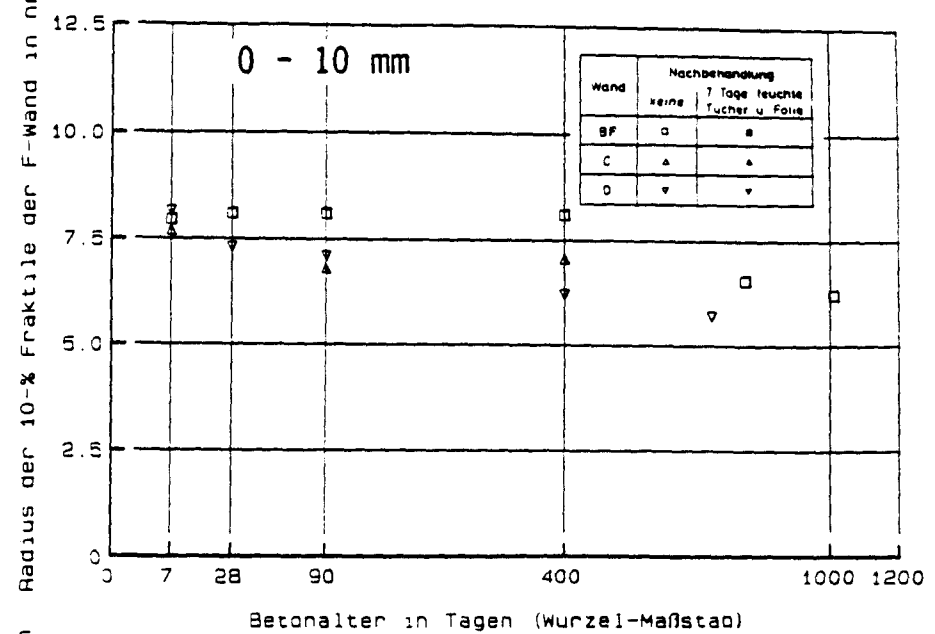


Bild D75

Zeitliche Entwicklung des Fraktilradius $r_{0,10}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

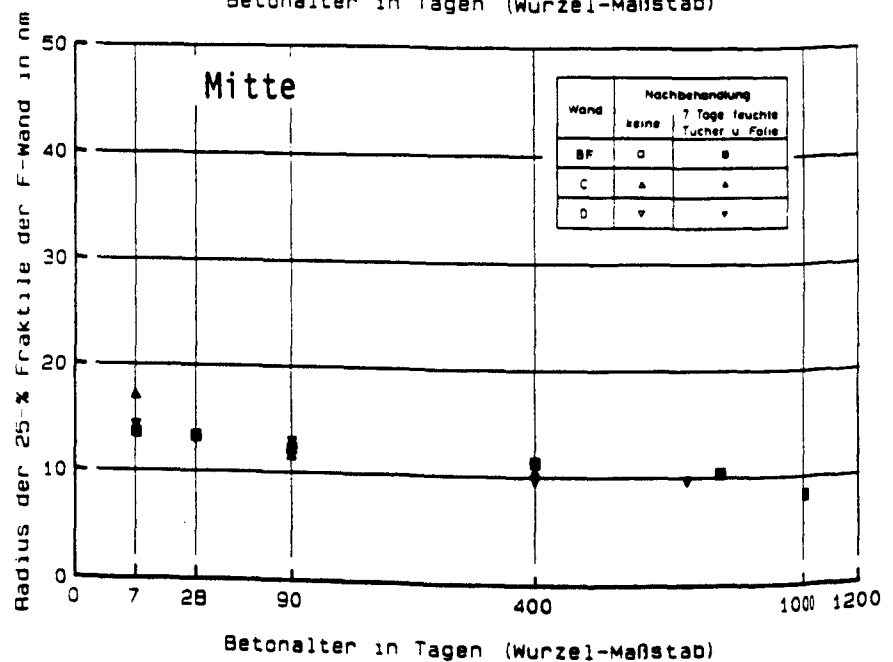
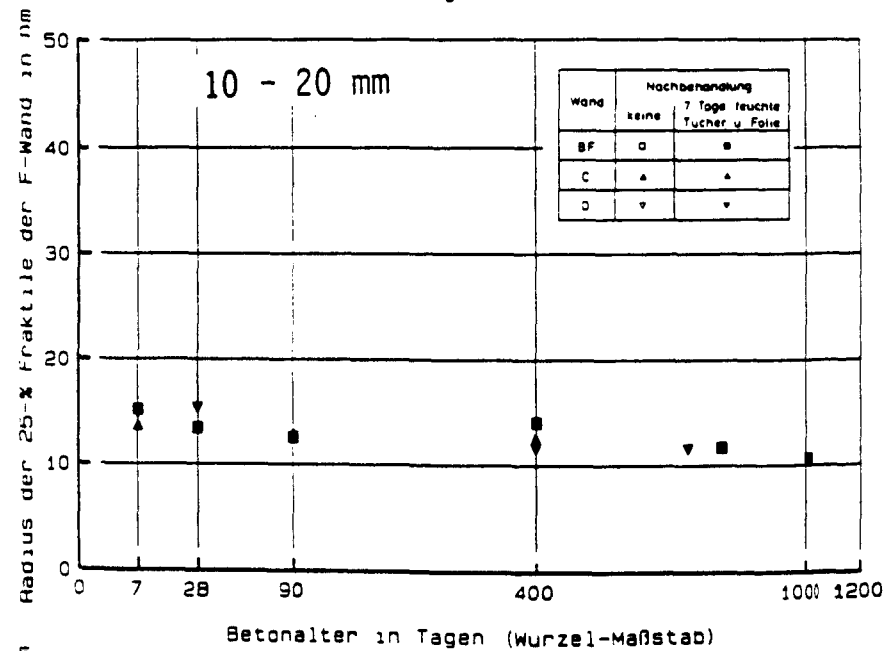
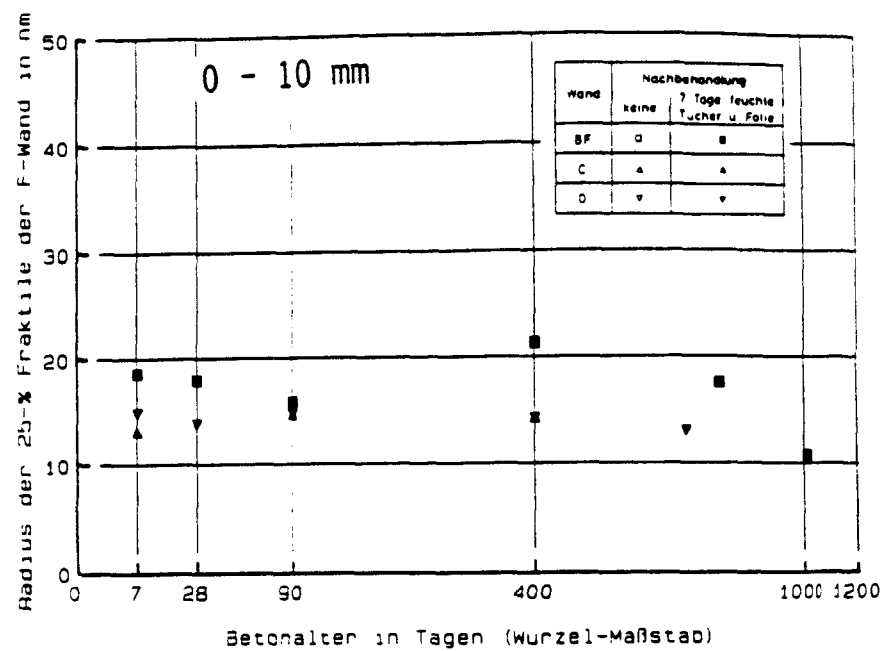


Bild D76

Zeitliche Entwicklung des Fraktalradius $r_{0,25}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

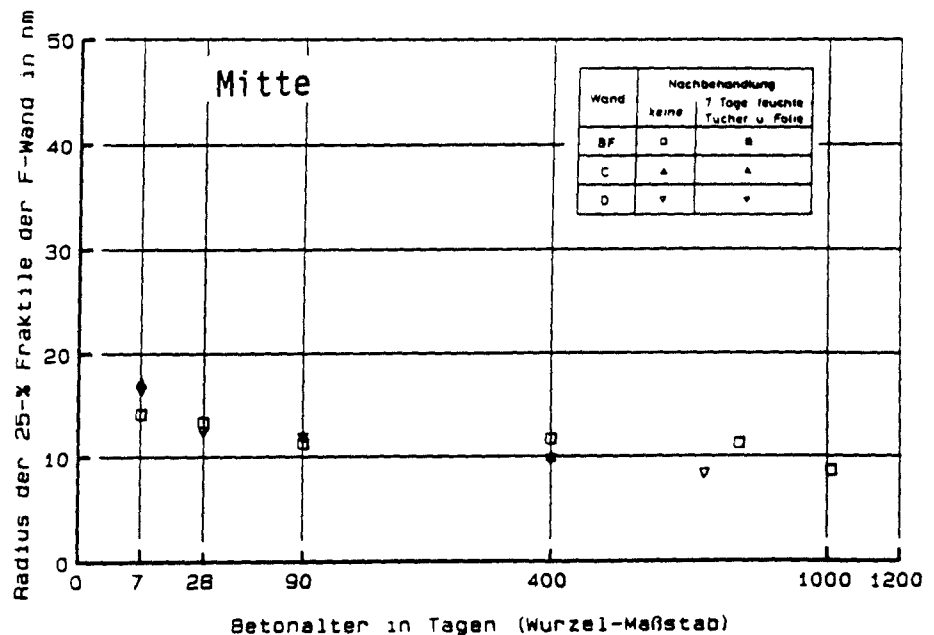
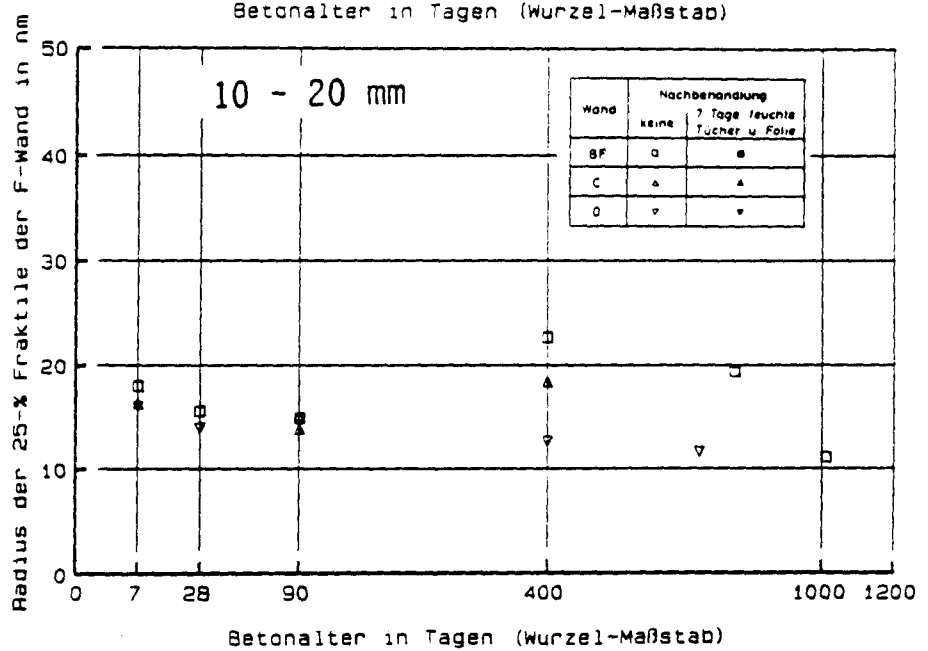
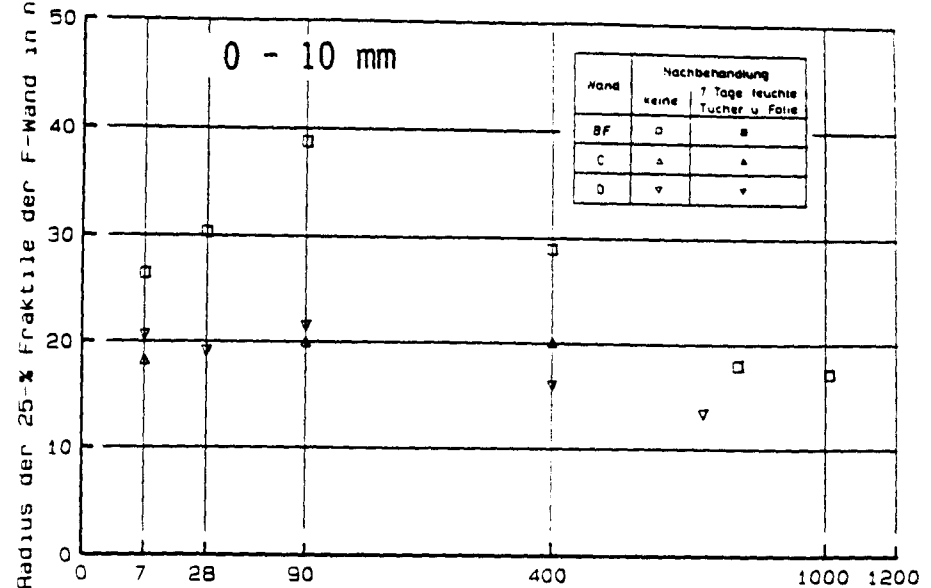


Bild D77

Zeitliche Entwicklung des Fraktilradius $r_{0,25}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

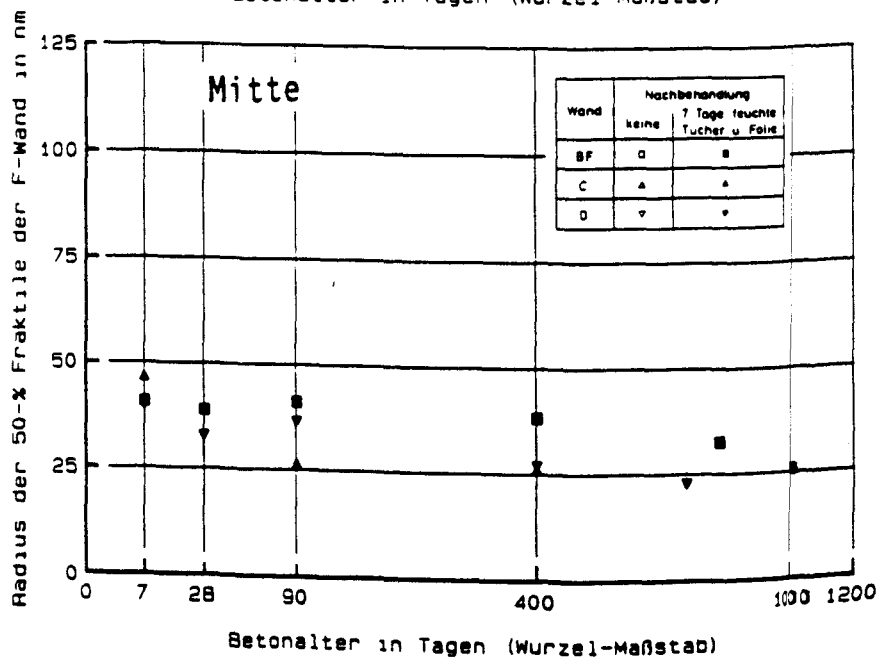
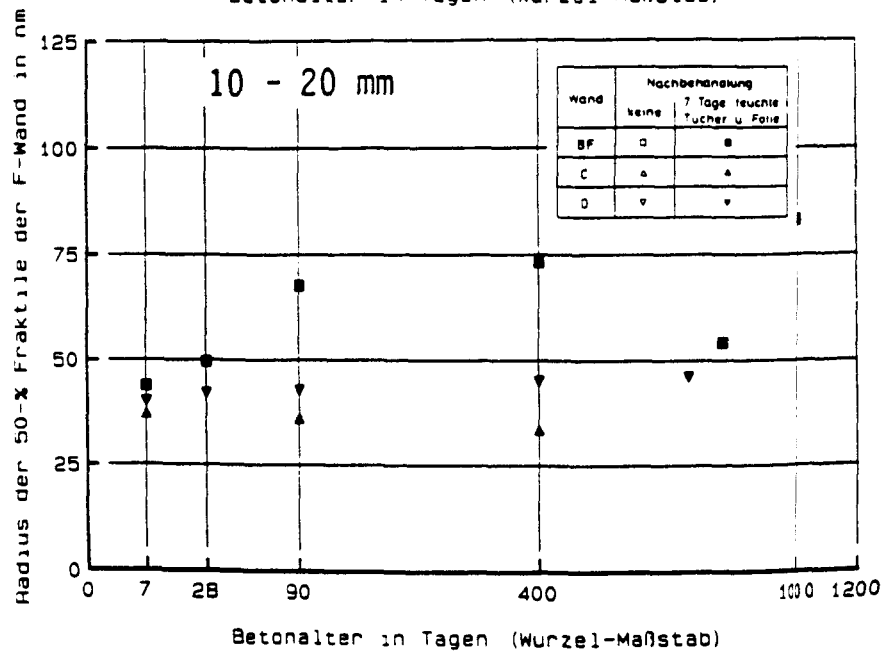
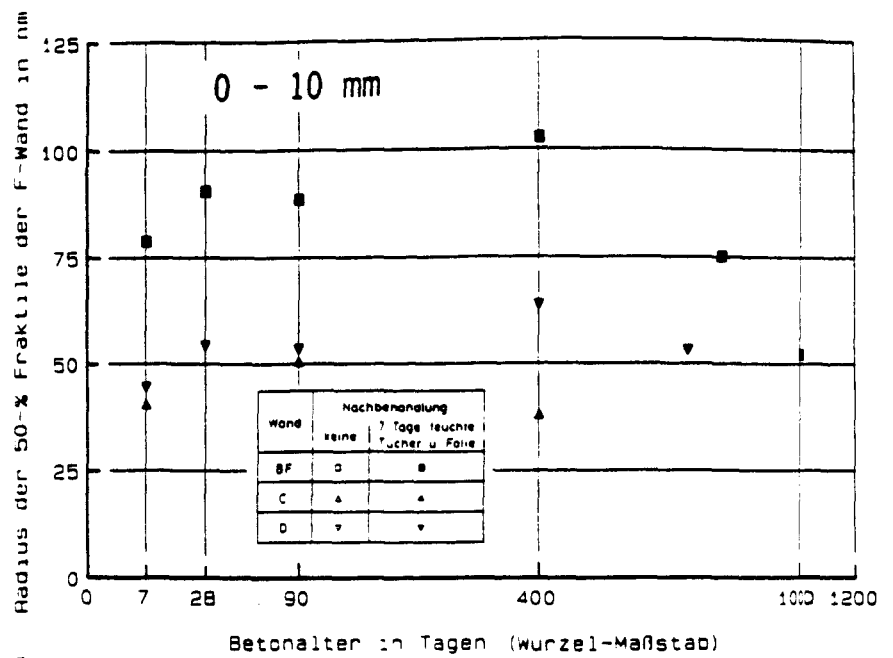


Bild D78

Zeitliche Entwicklung des Fraktalradius $r_{0,50}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

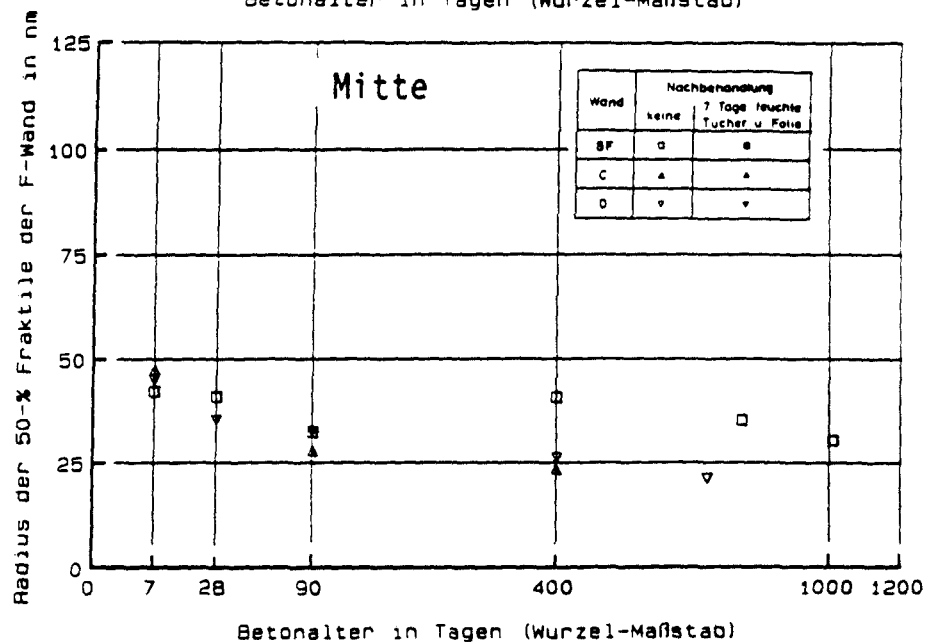
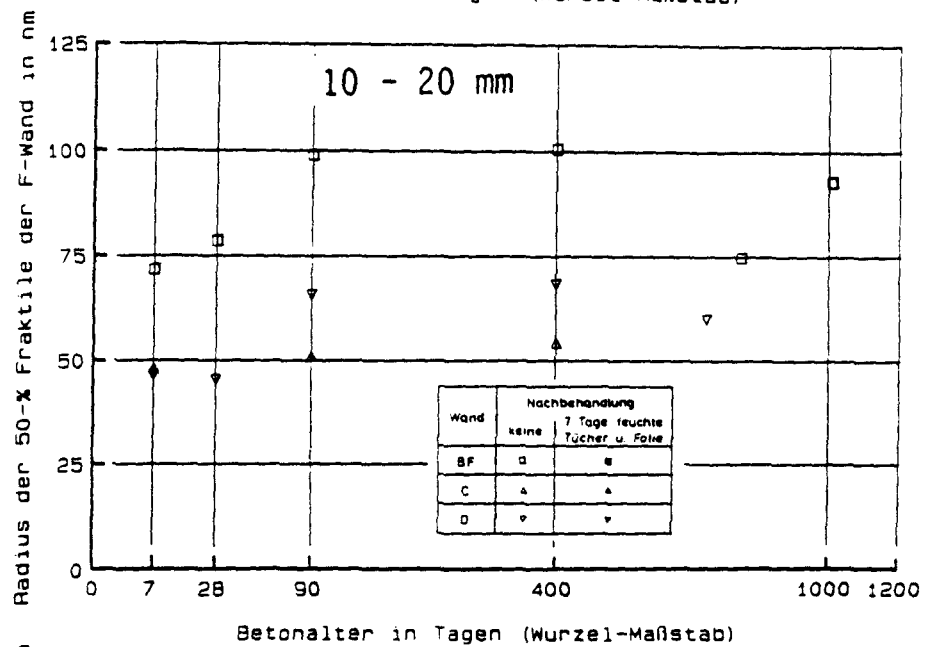
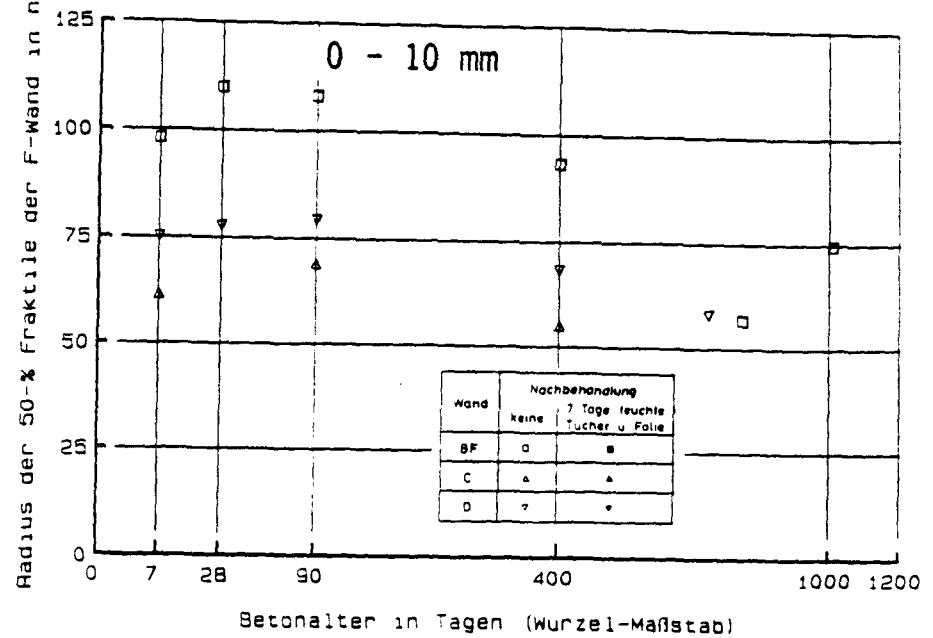


Bild D79

Zeitliche Entwicklung des Fraktalradius $r_{0,50}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

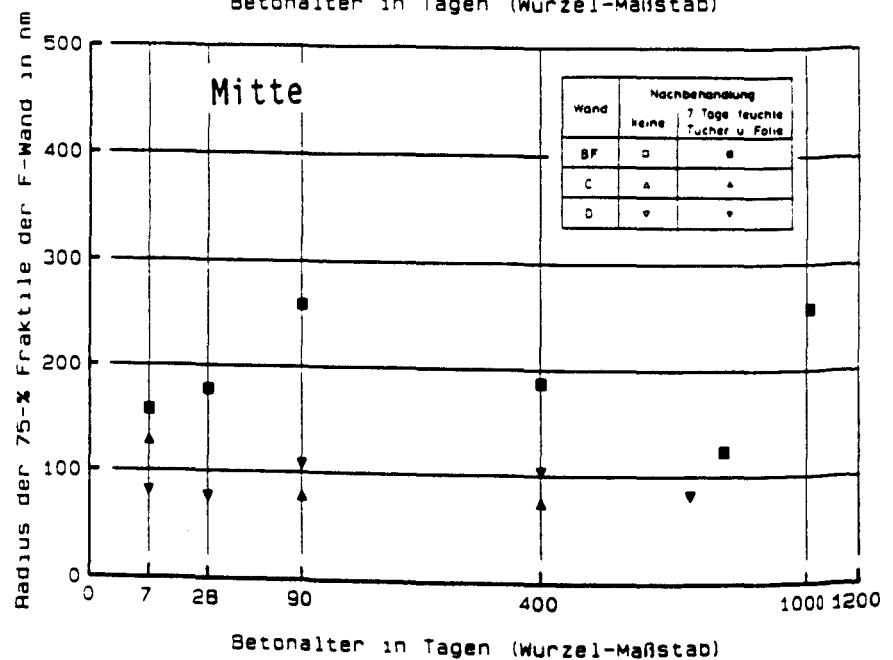
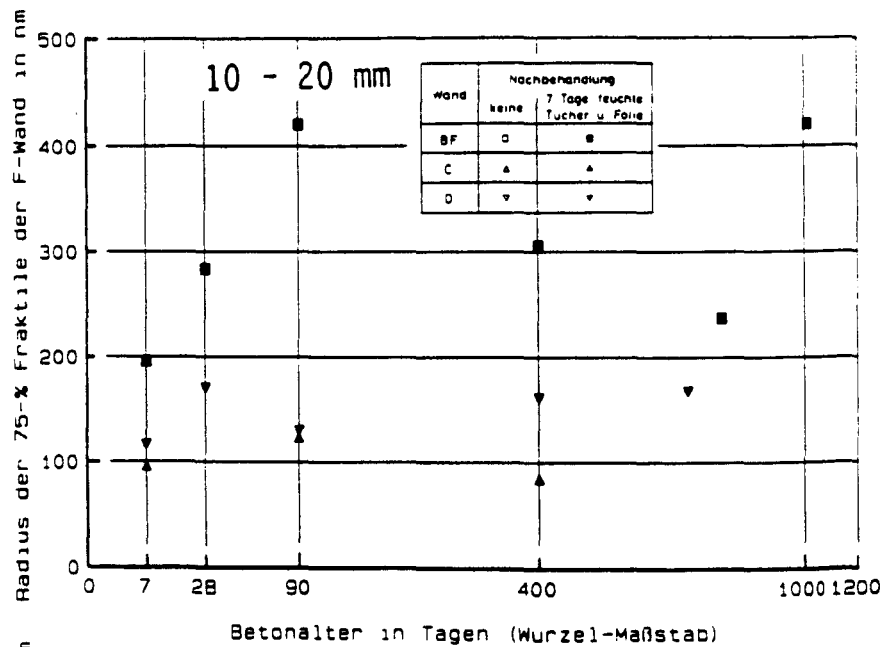
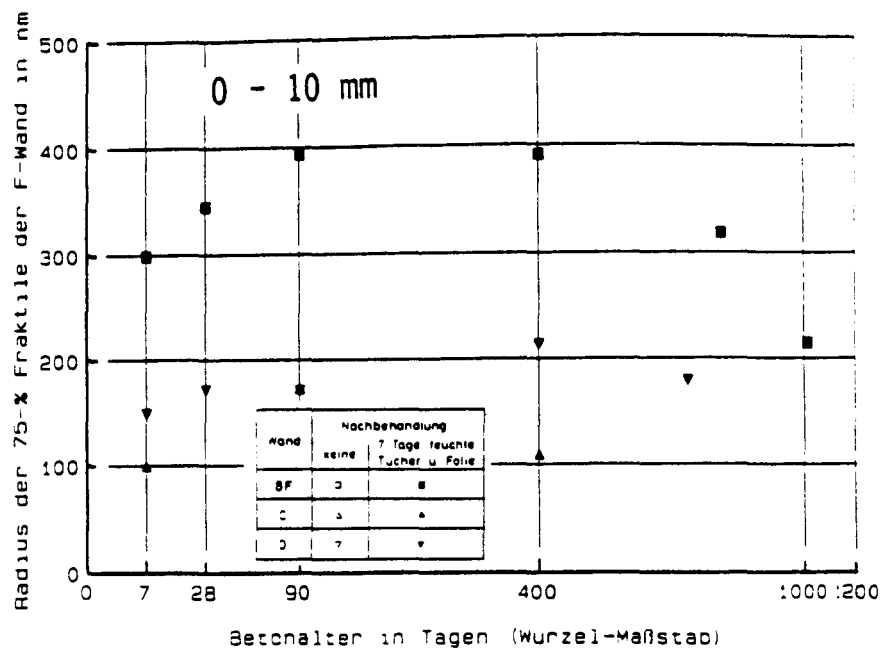


Bild D80

Zeitliche Entwicklung des Fraktalradius $r_{0,75}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

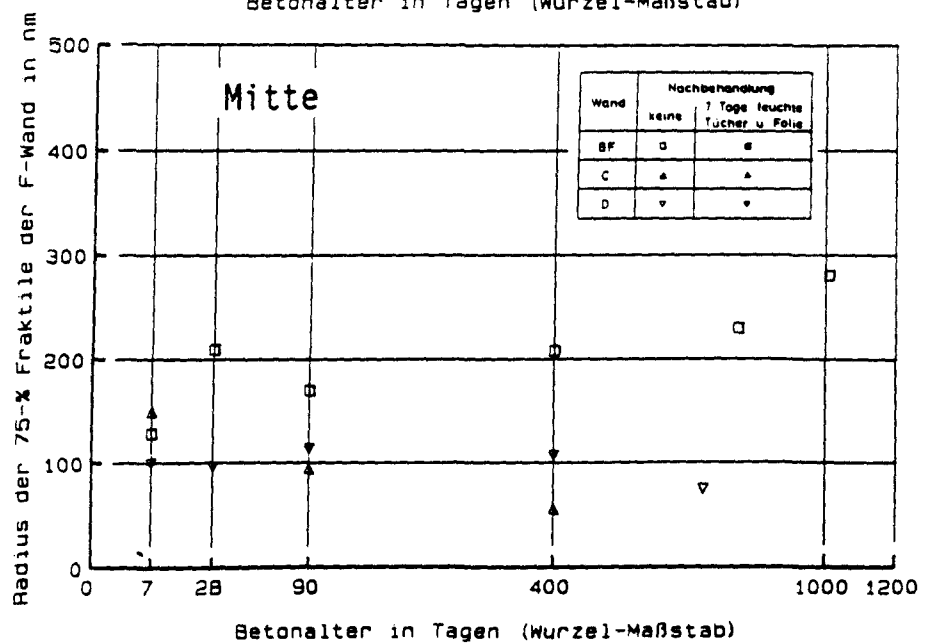
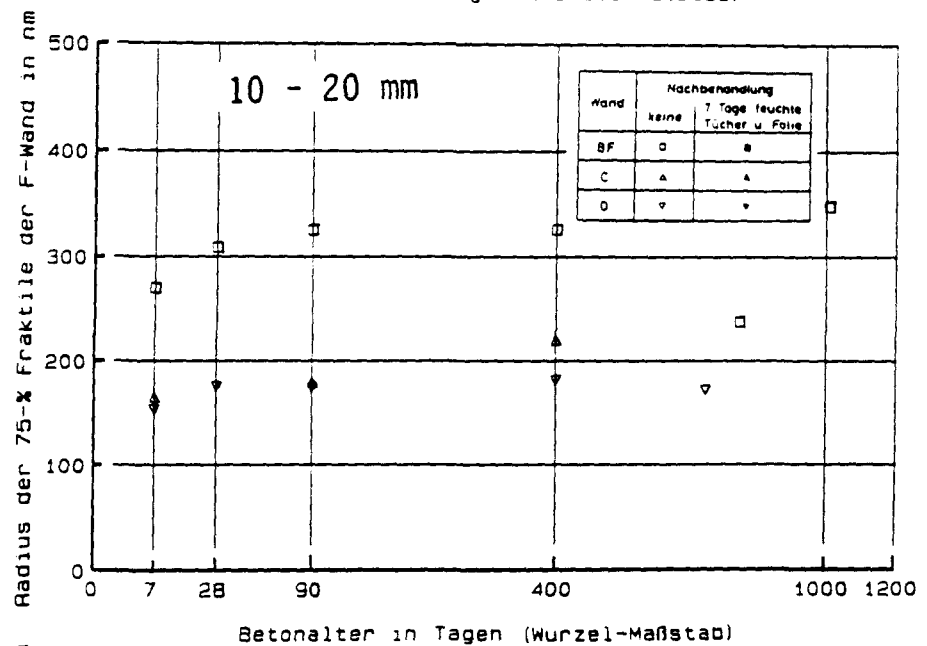
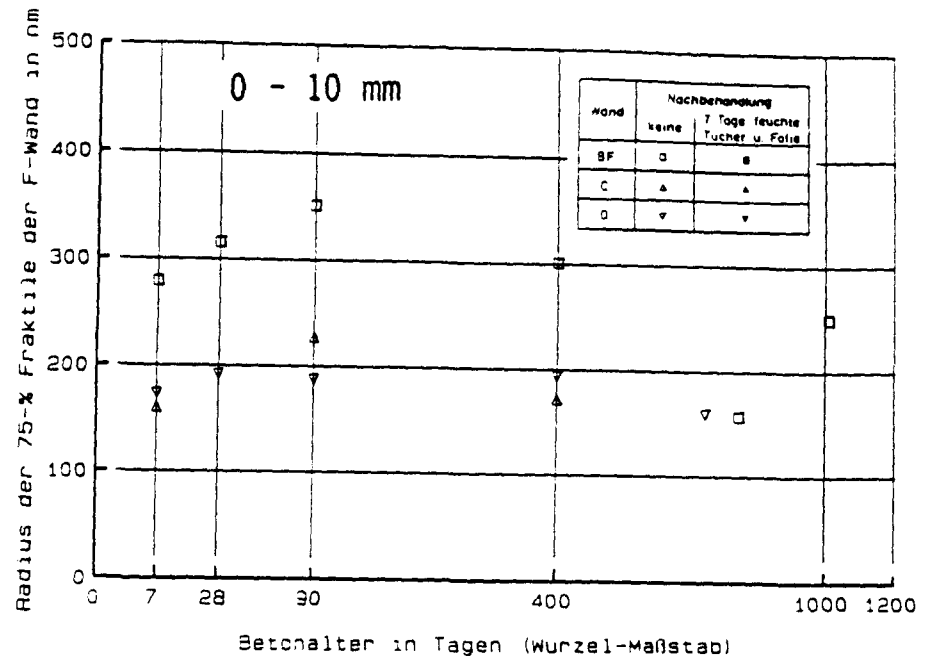


Bild D81

Zeitliche Entwicklung des Fraktilradius $r_{0,75}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

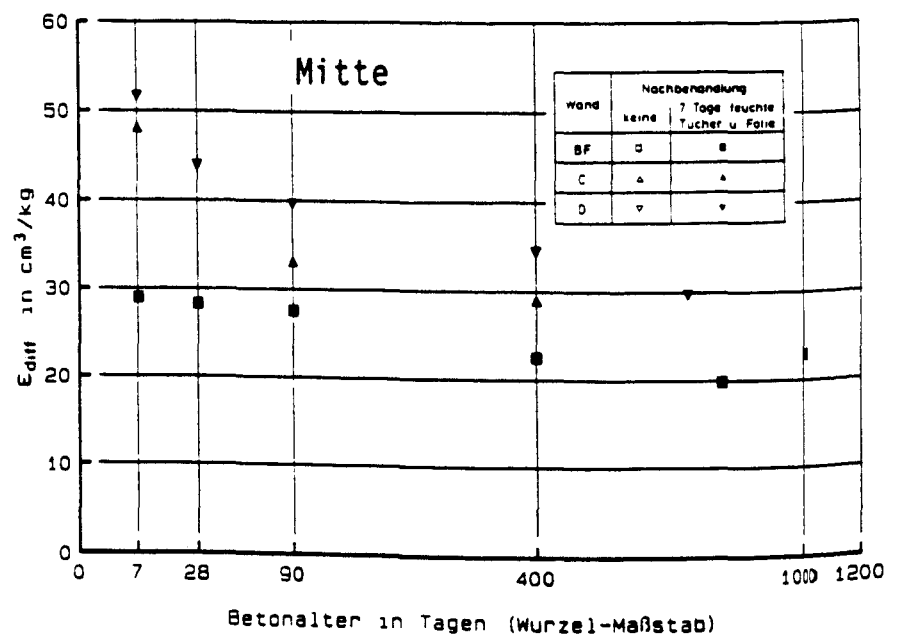
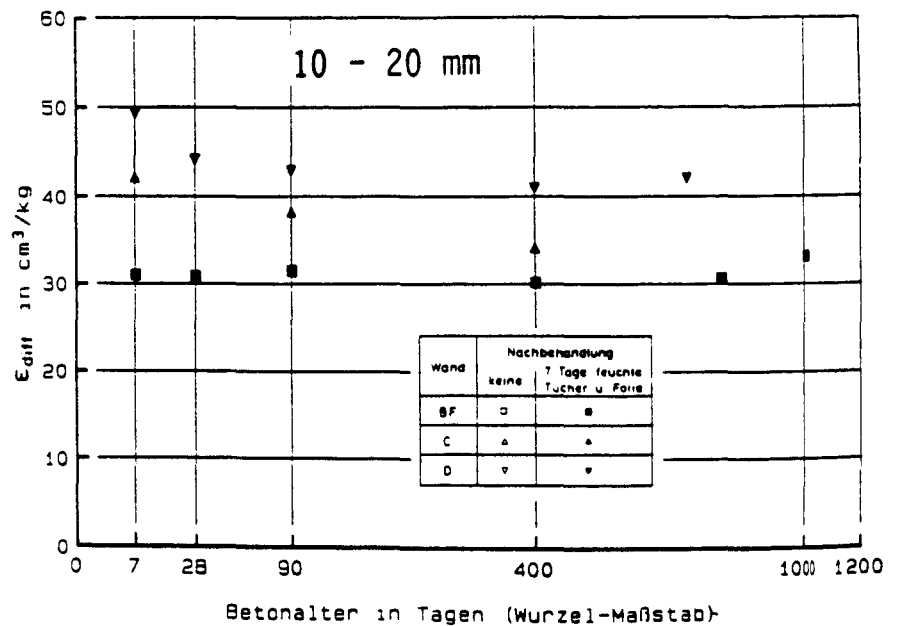
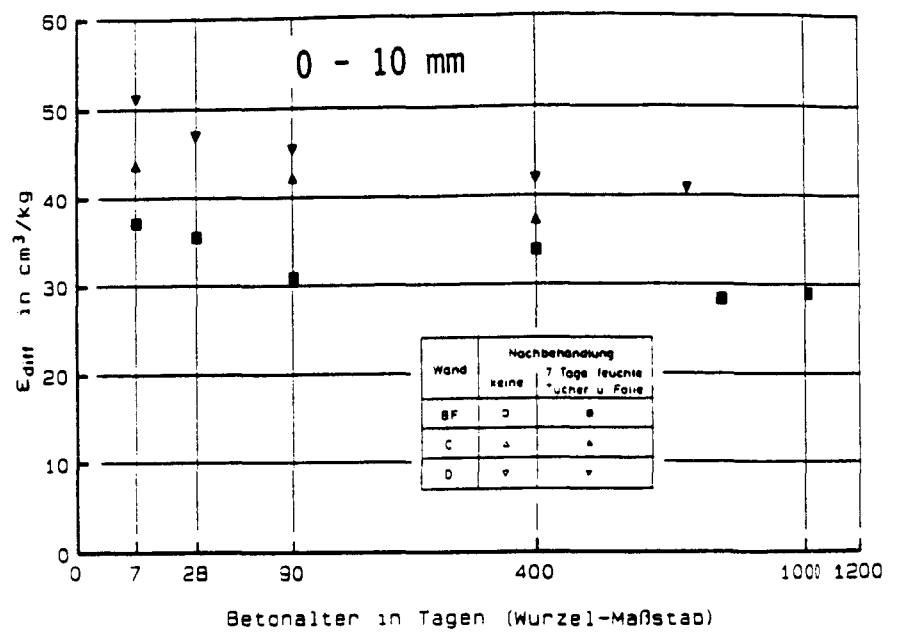


Bild D82

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

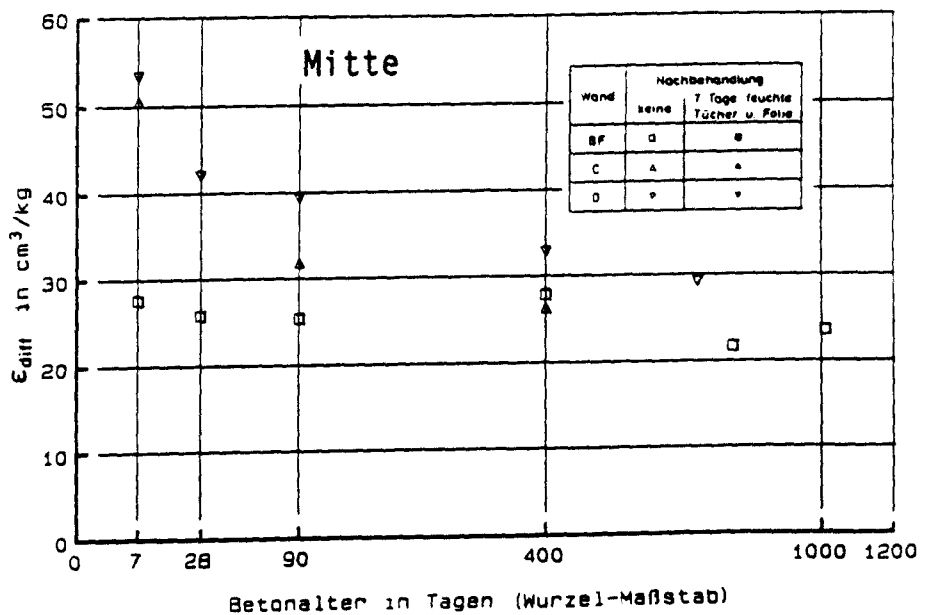
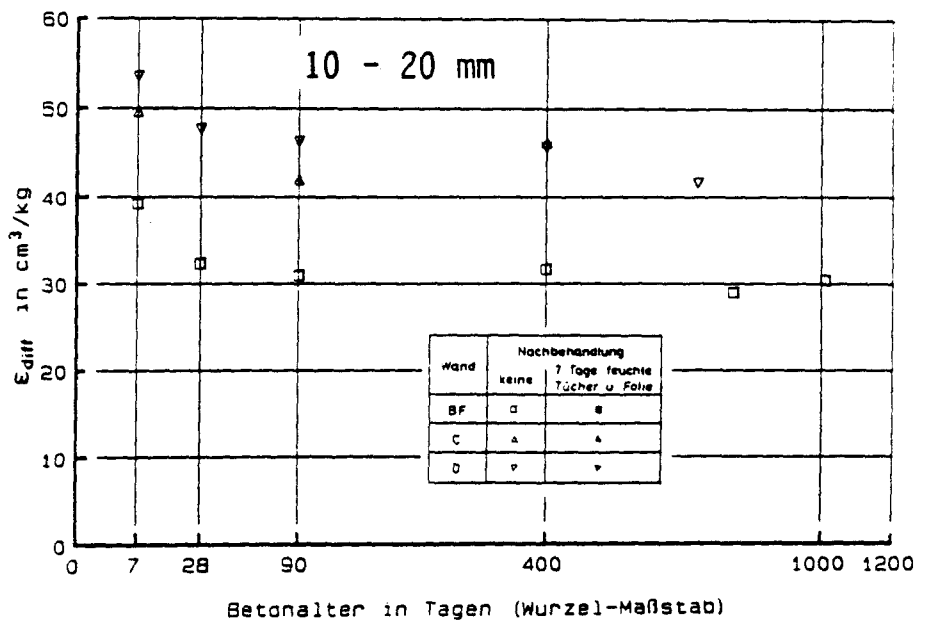
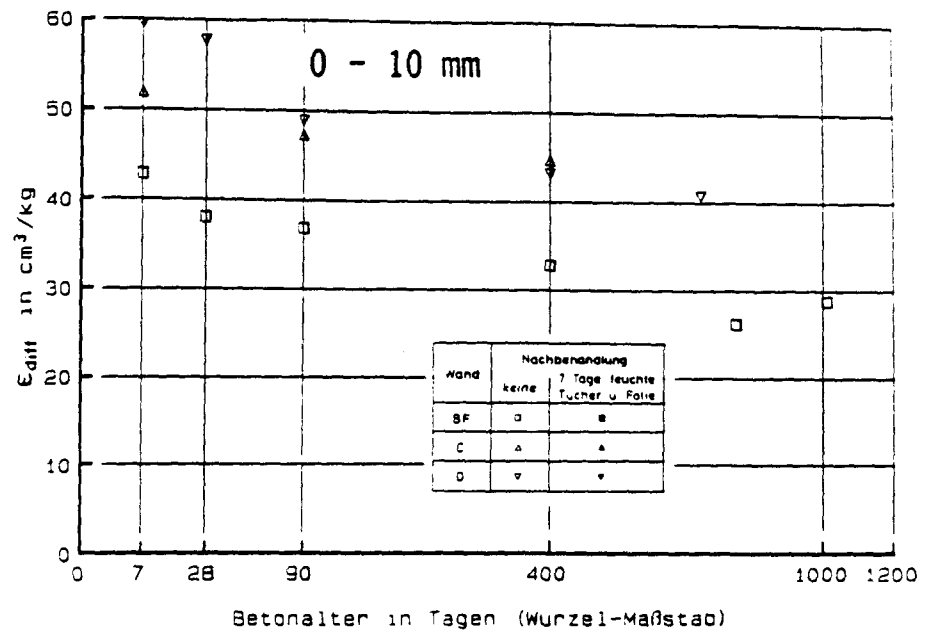


Bild D83

Zeitliche Entwicklung der diffundierbaren Porosität ϵ_{diff} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

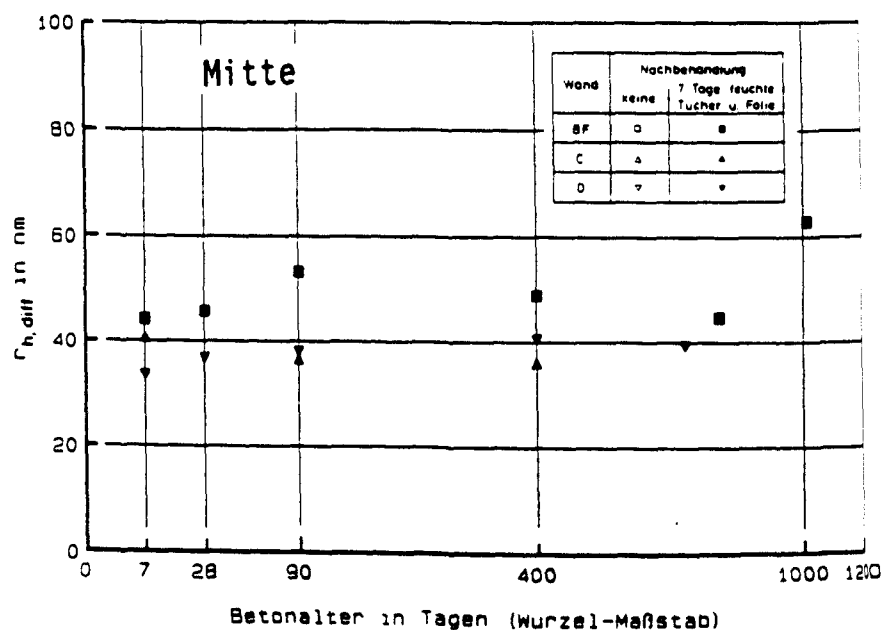
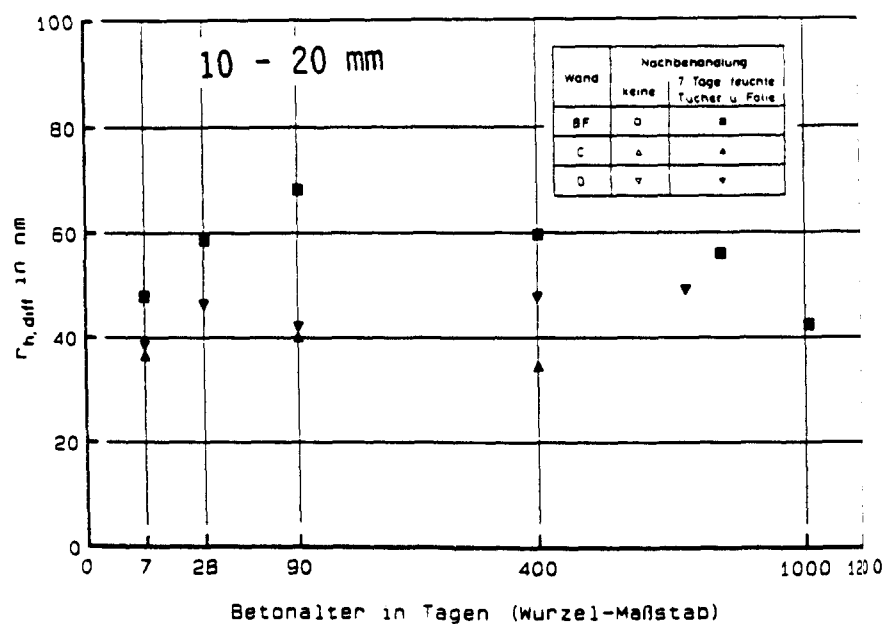
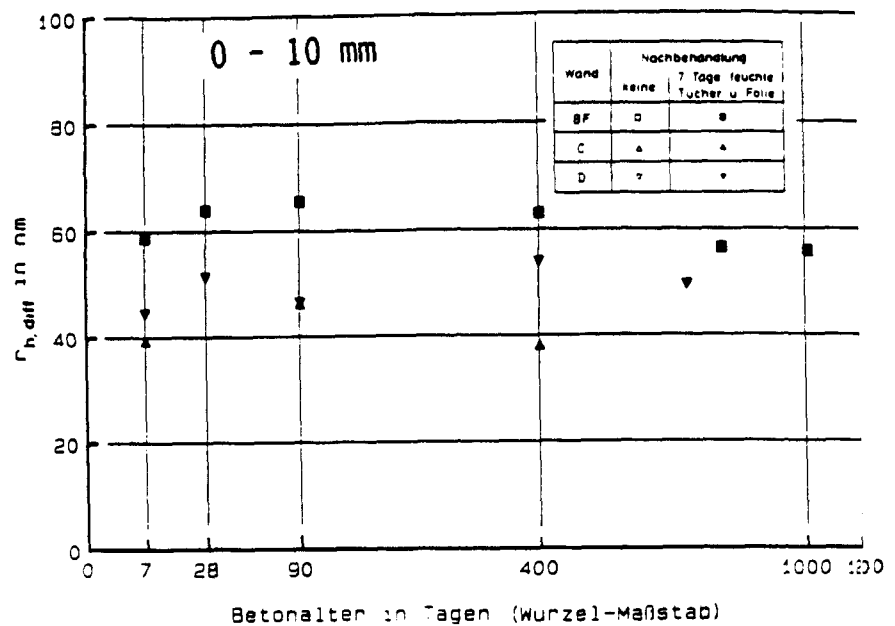


Bild D84

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

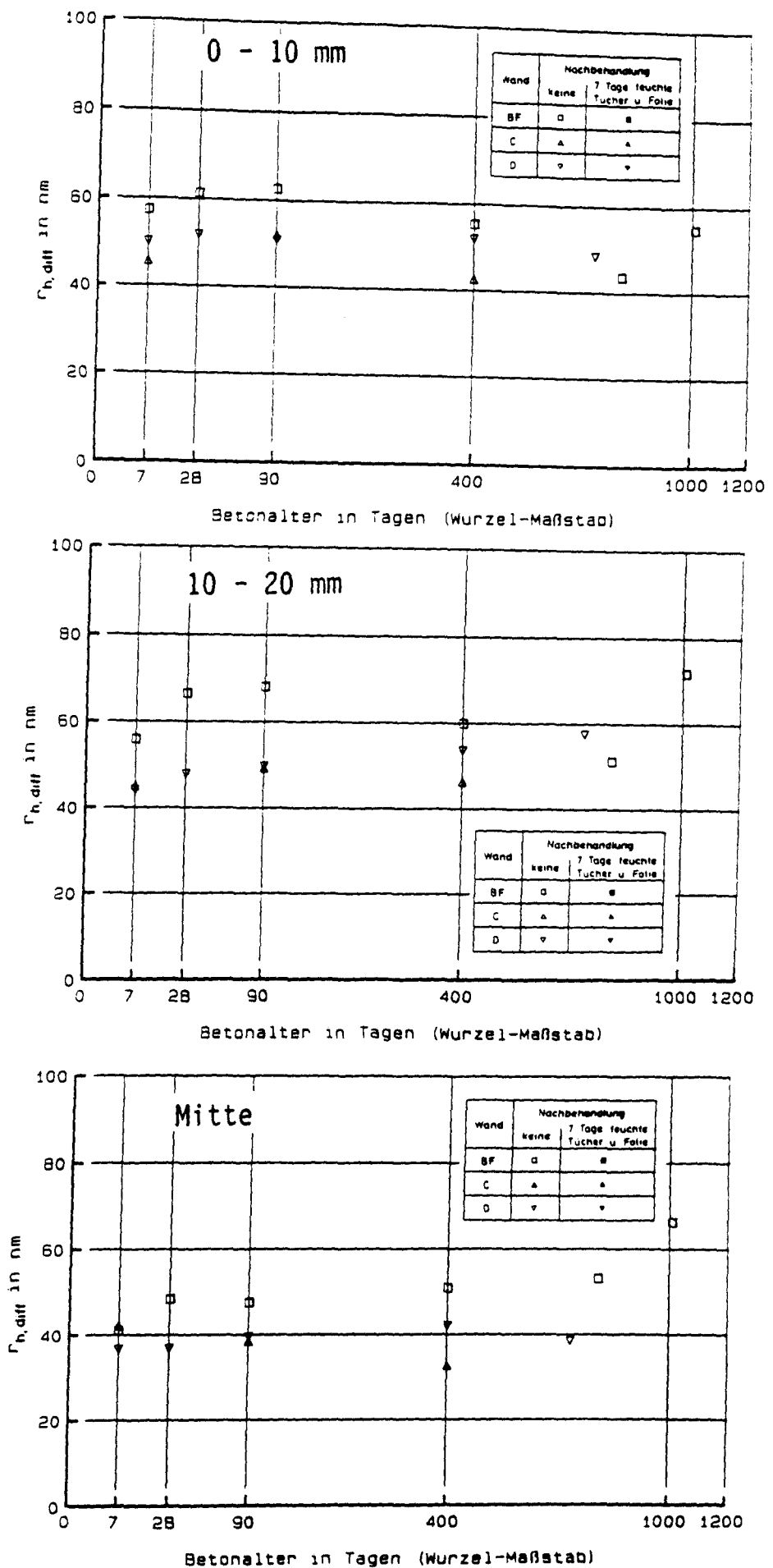


Bild D85

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,diff}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

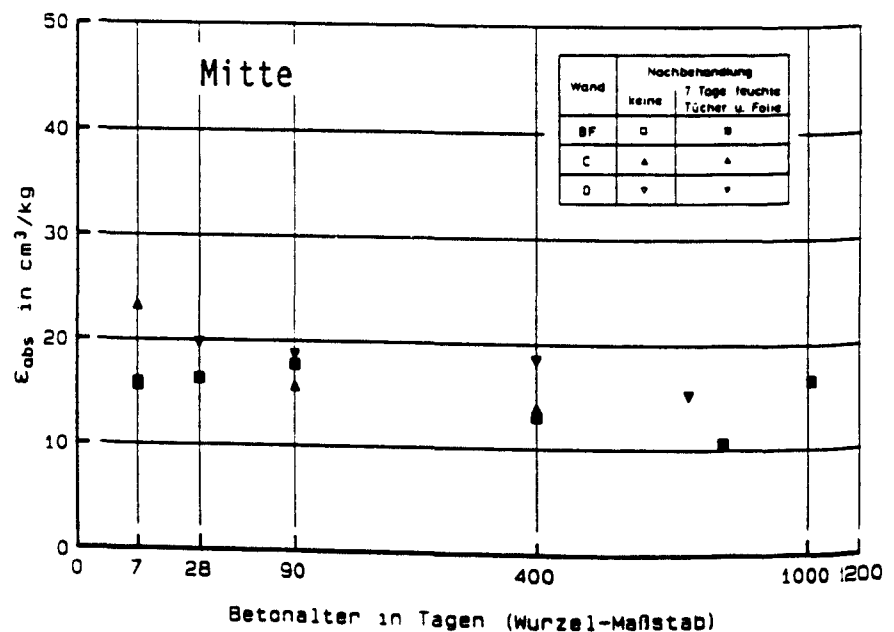
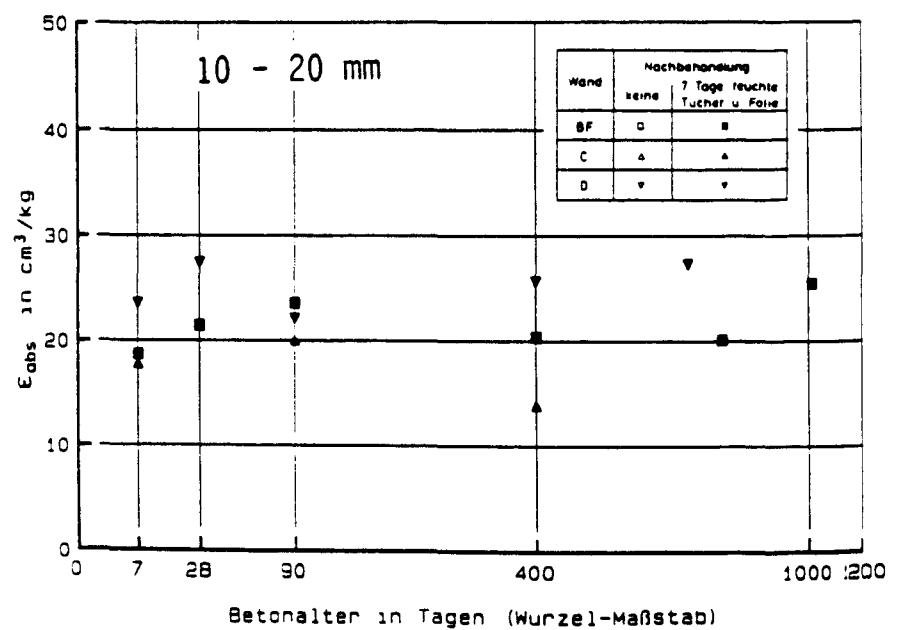
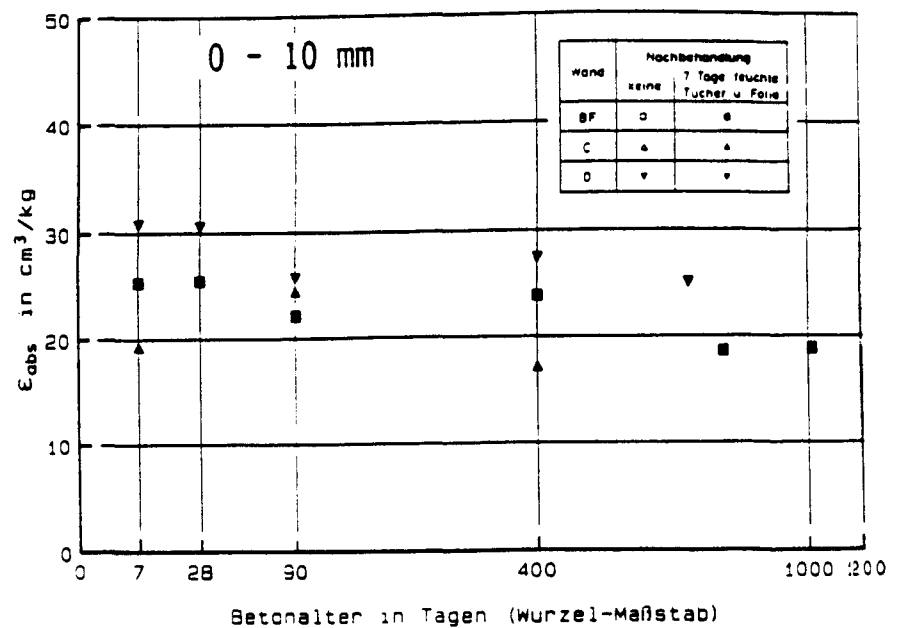


Bild D86

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

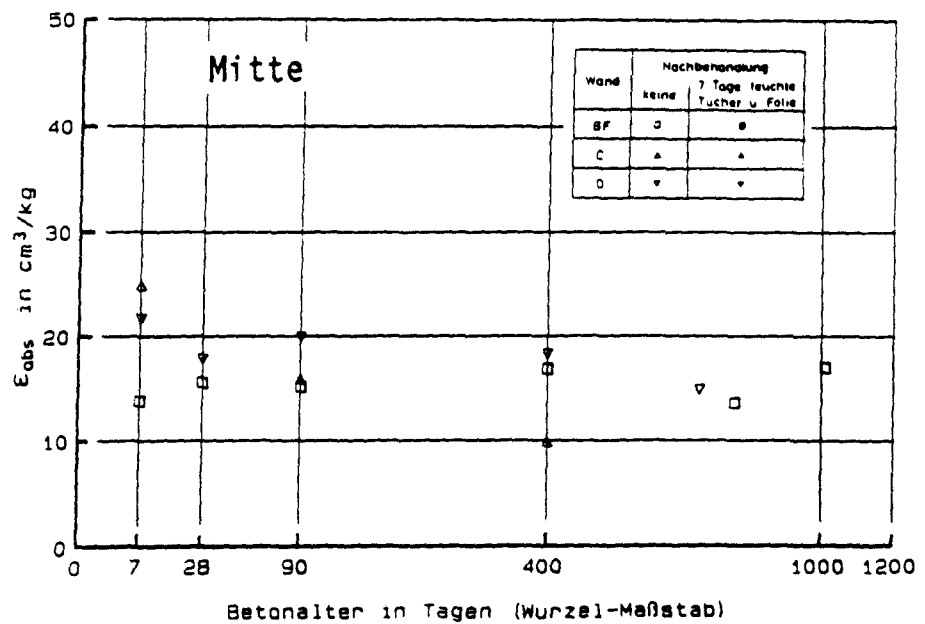
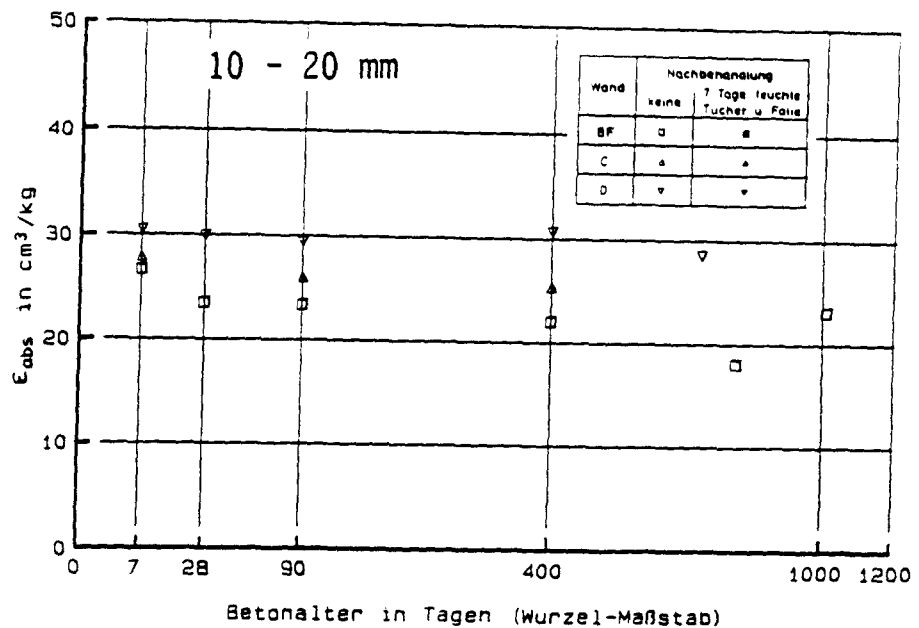
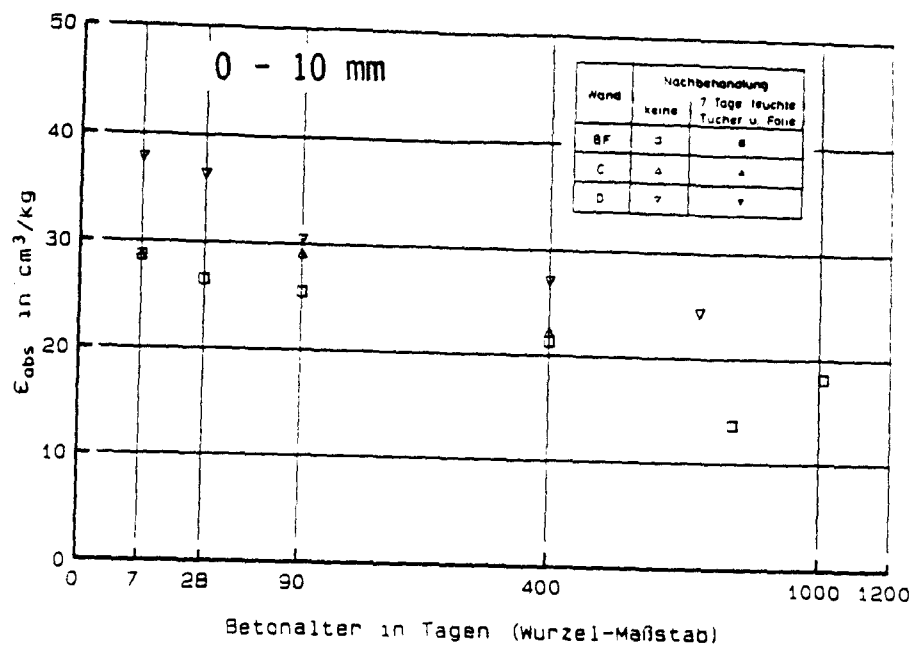


Bild D87

Zeitliche Entwicklung der kapillar wirksamen Porosität ϵ_{abs} für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

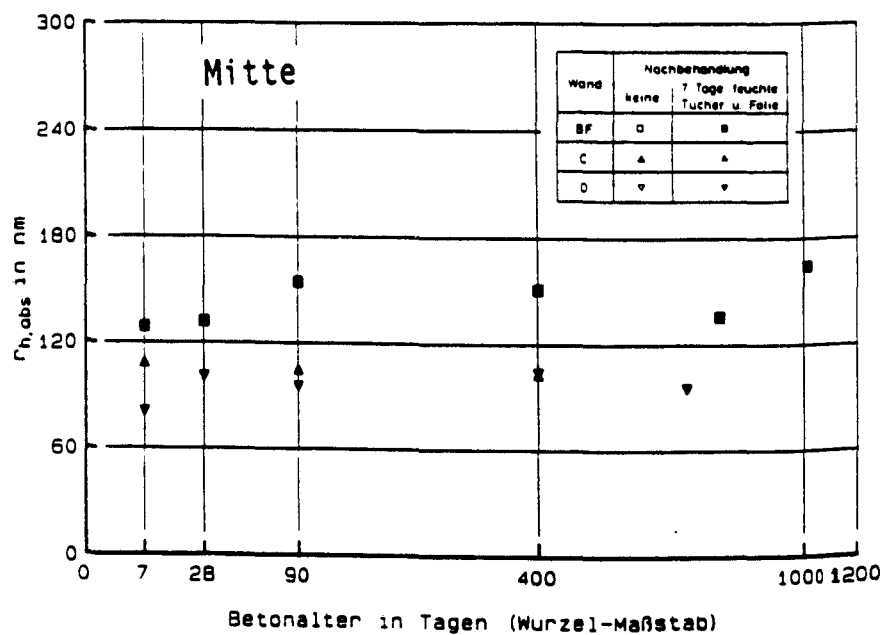
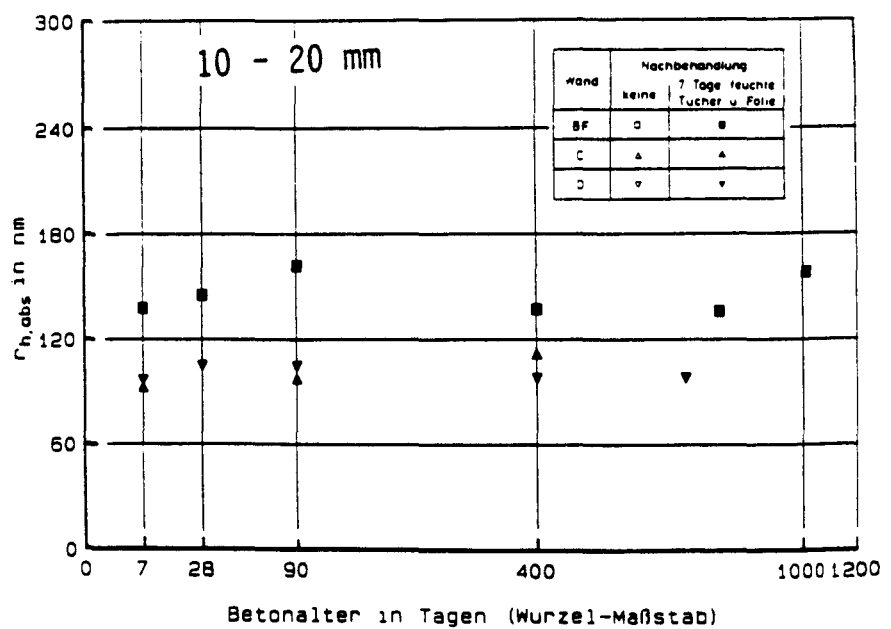
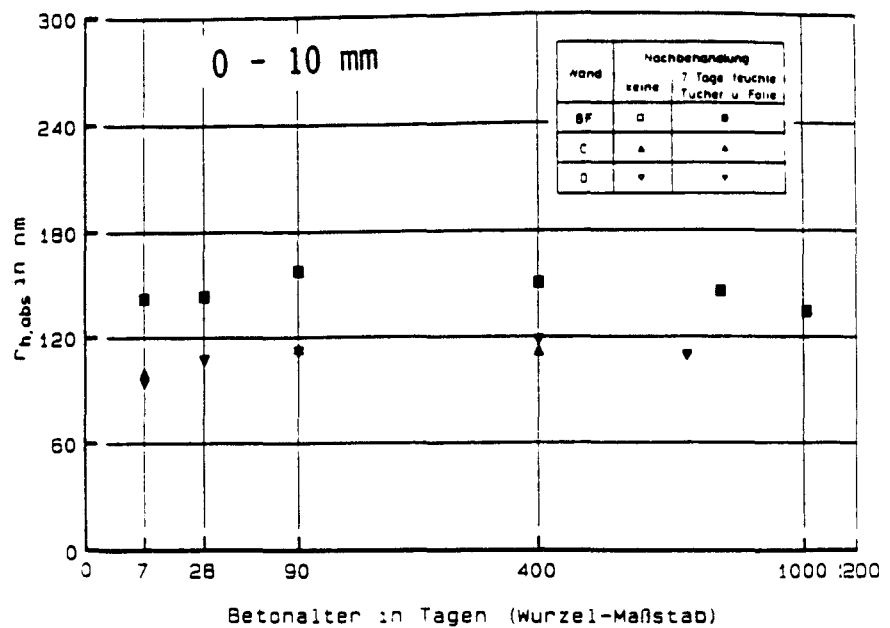


Bild D88

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

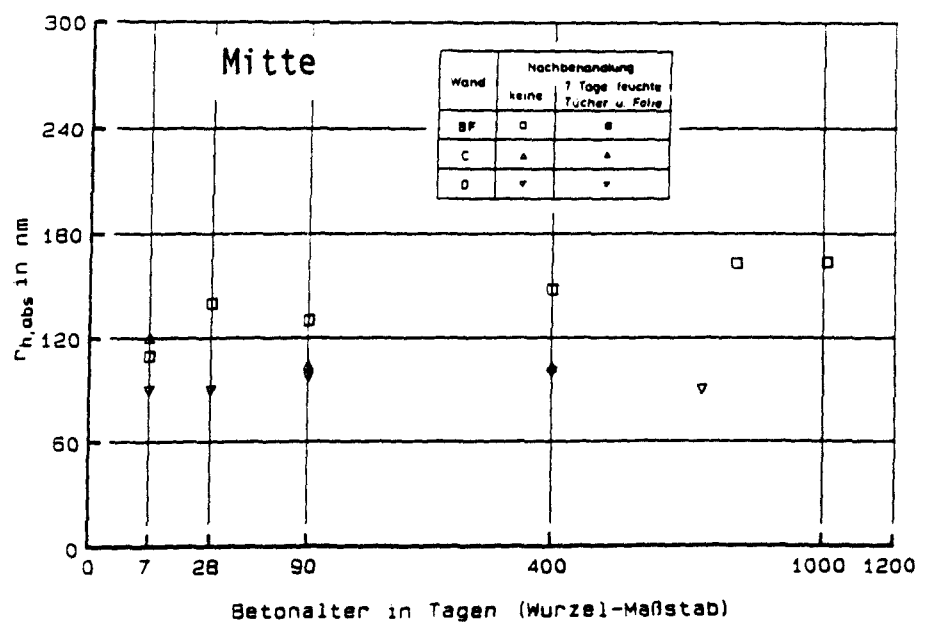
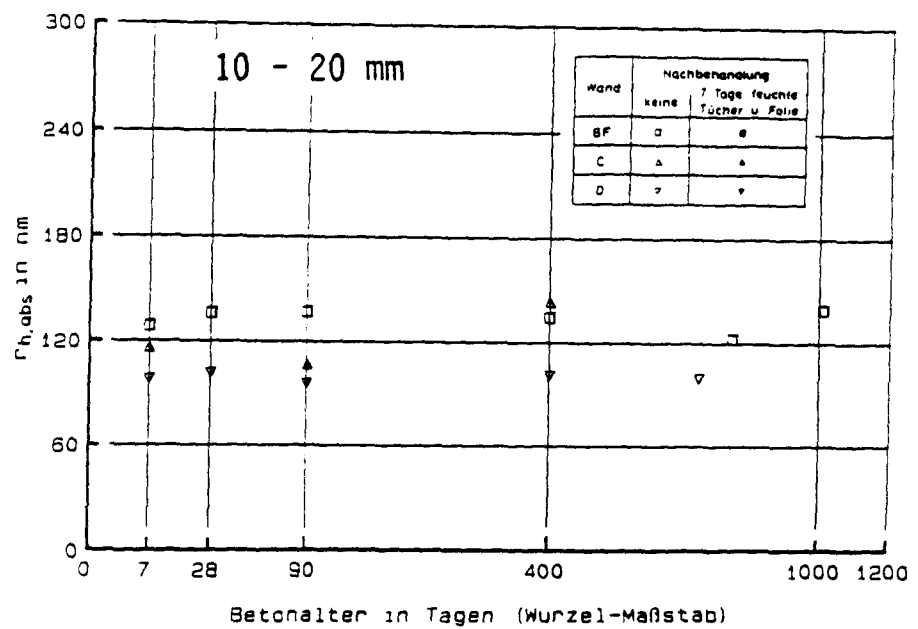
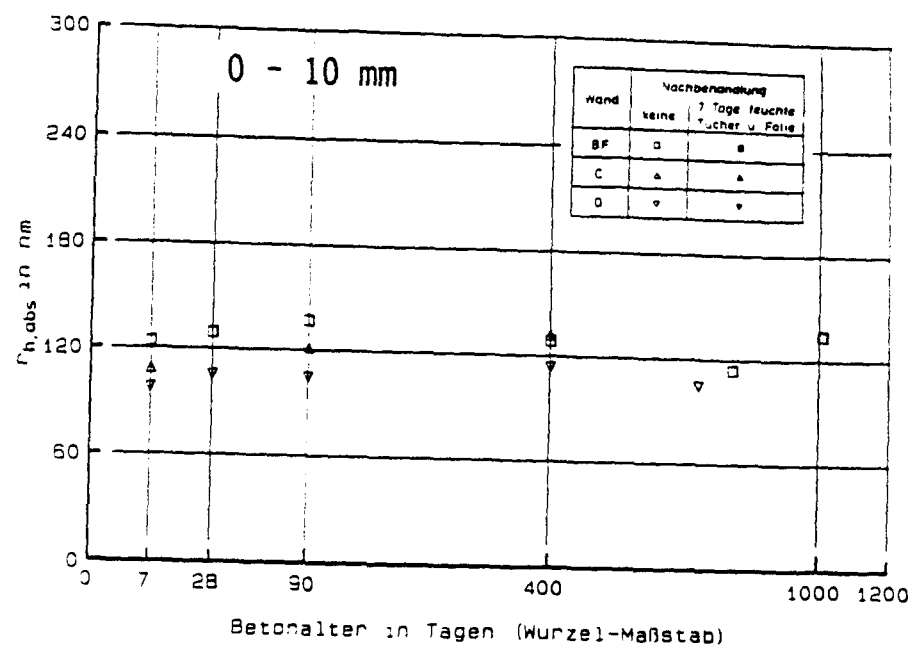


Bild D89

Zeitliche Entwicklung des hydraulischen Radius $r_{h,abs}$ für die Wandtiefen 0 - 10 mm (oben), 10 - 20 mm (Mitte) und die Wandmitte (unten) der nicht nachbehandelten Wandhälften der Wände BF, C und D.

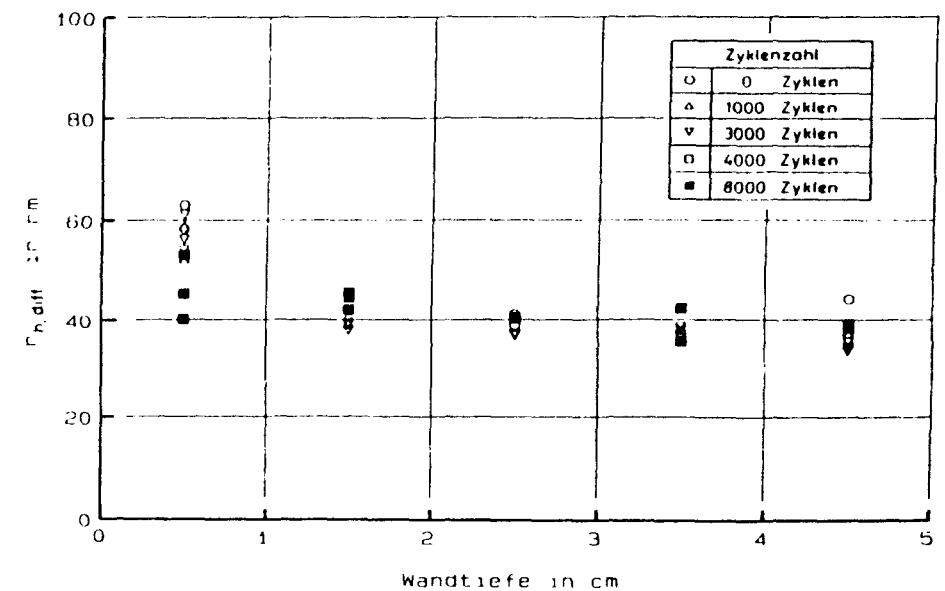
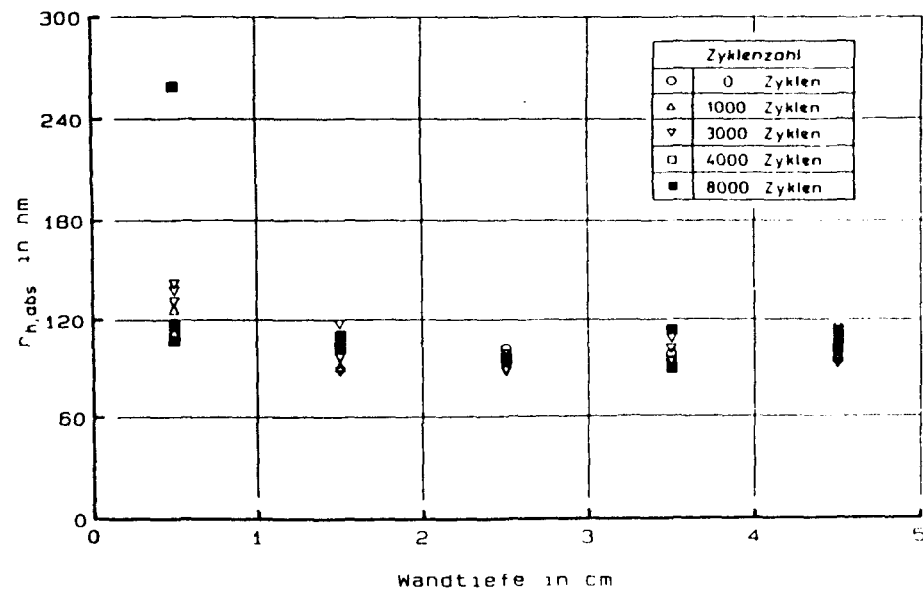
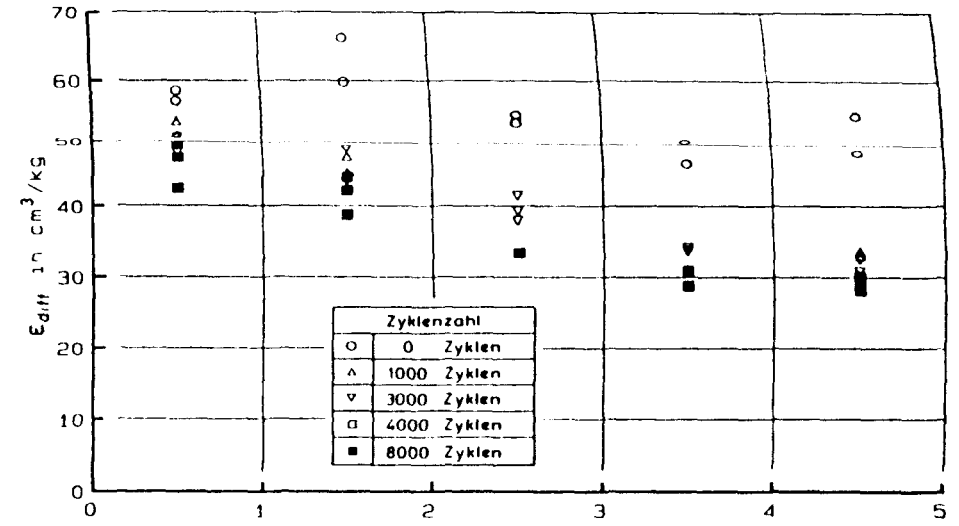
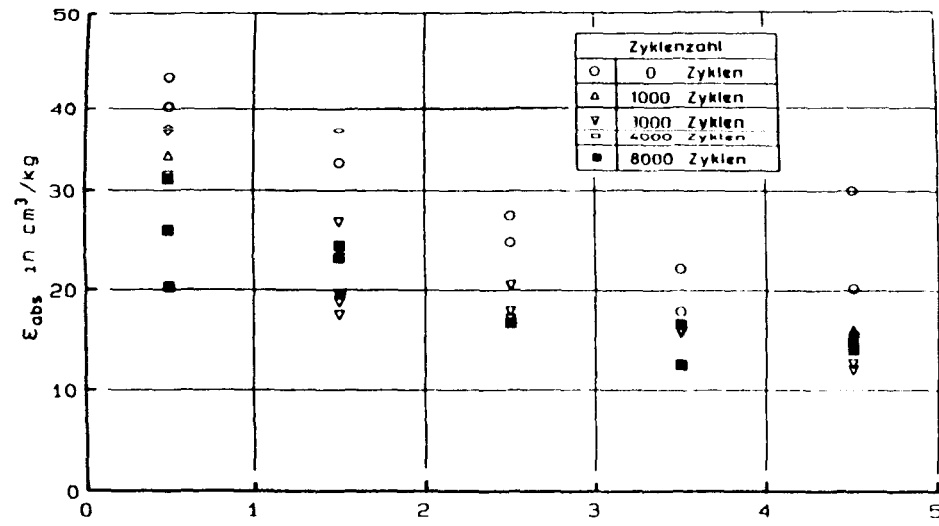
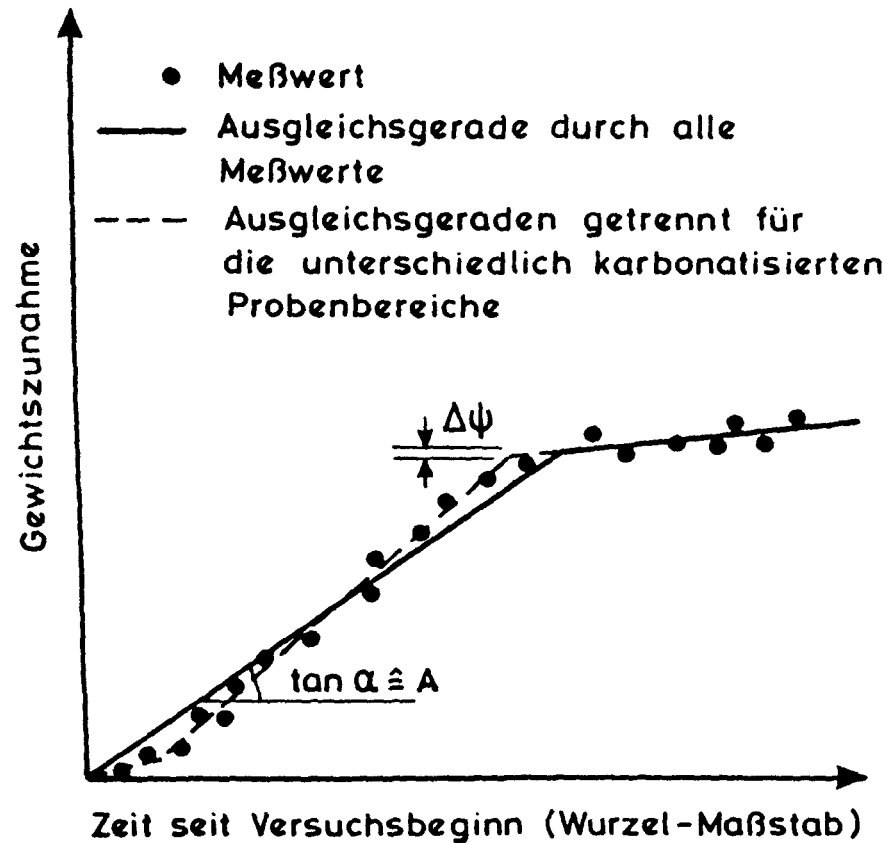


Bild D90

Abhängigkeit der transportrelevanten Kennwerte der Porenradienverteilung von der Wandtiefe des künstlich bewitterten Kleinkörpers von Wand C getrennt nach der aufgetragenen Anzahl der Bewitterungszyklen.

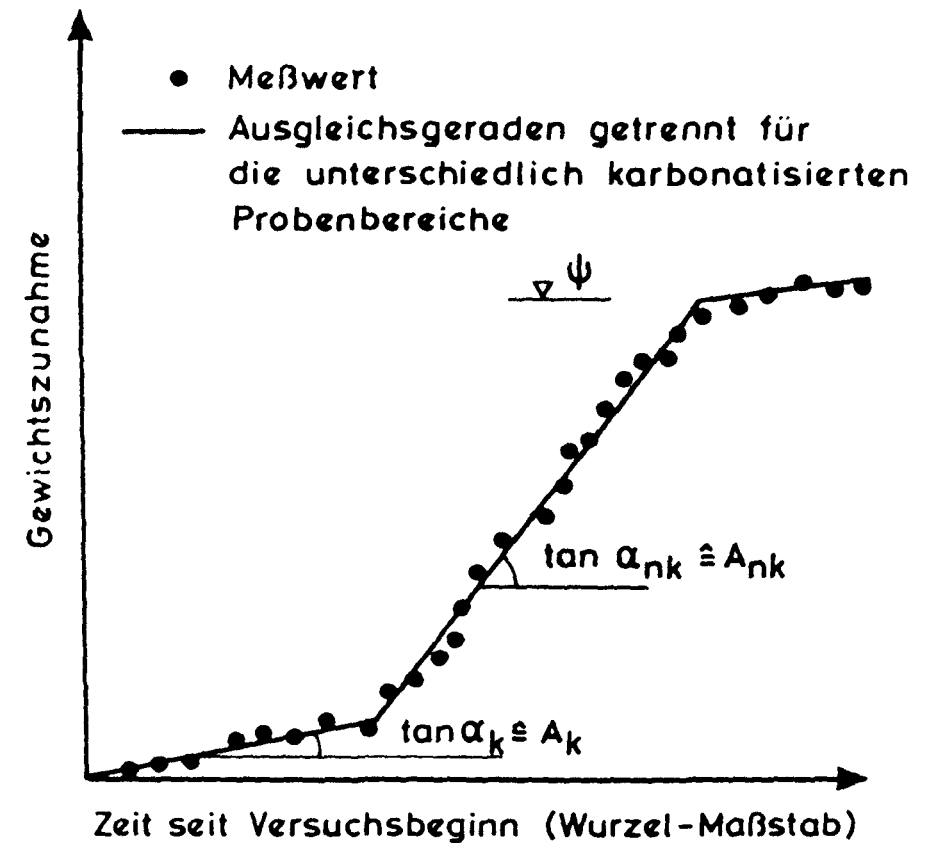
Wand A - D

(Fall b , geringe Karbonatisierungstiefe)



Versuchshäuser Beckum

(Fall a , große Karbonatisierungstiefe)



A_k : Wasseraufnahmekoeffizient des karbonatisierten Probenteils

A_{nk} : Wasseraufnahmekoeffizient des nicht karbonatisierten Probenteils

Bild D91: Auswirkung der Karbonatisierung auf die kapillare Wasseraufnahme und ihre Berücksichtigung bei der Versuchsauswertung (qualitativ).

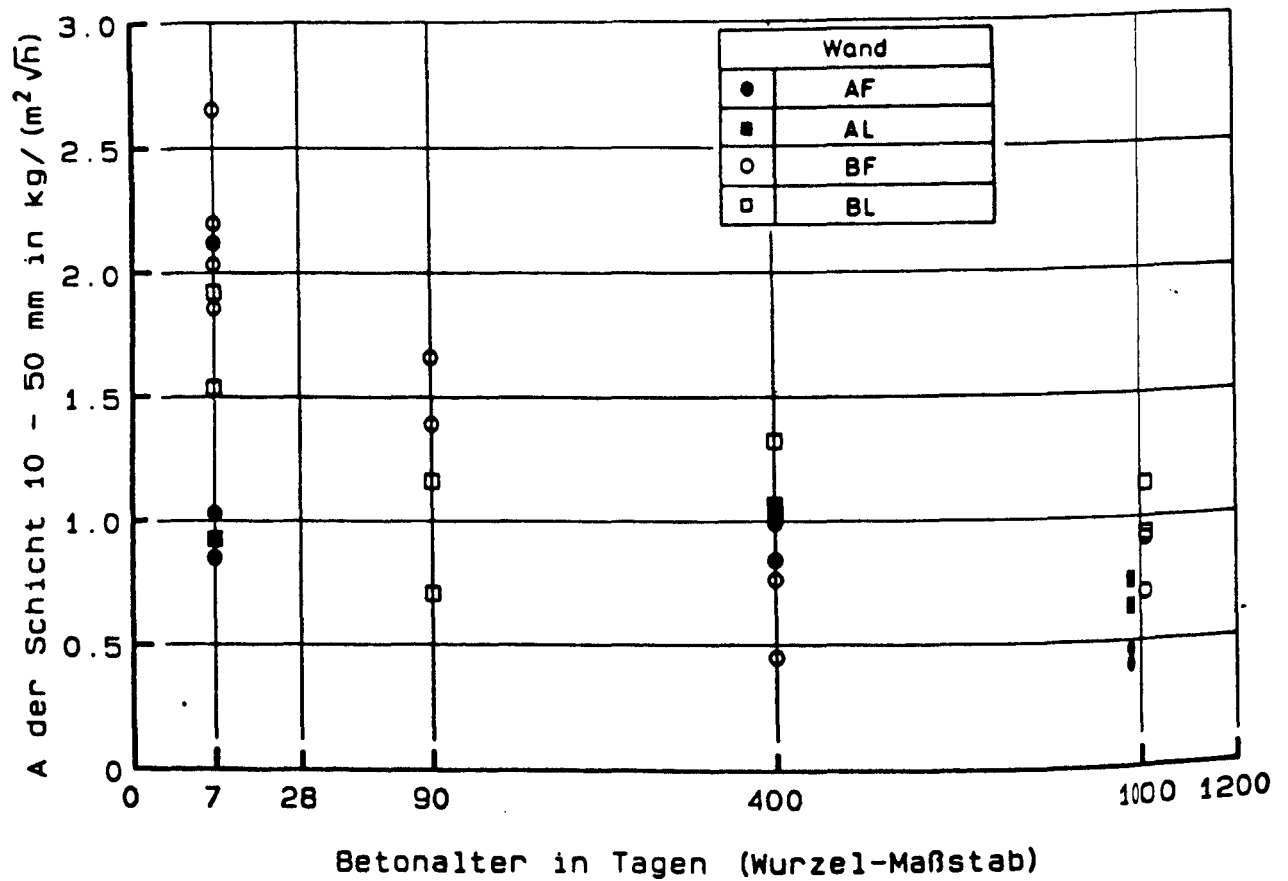
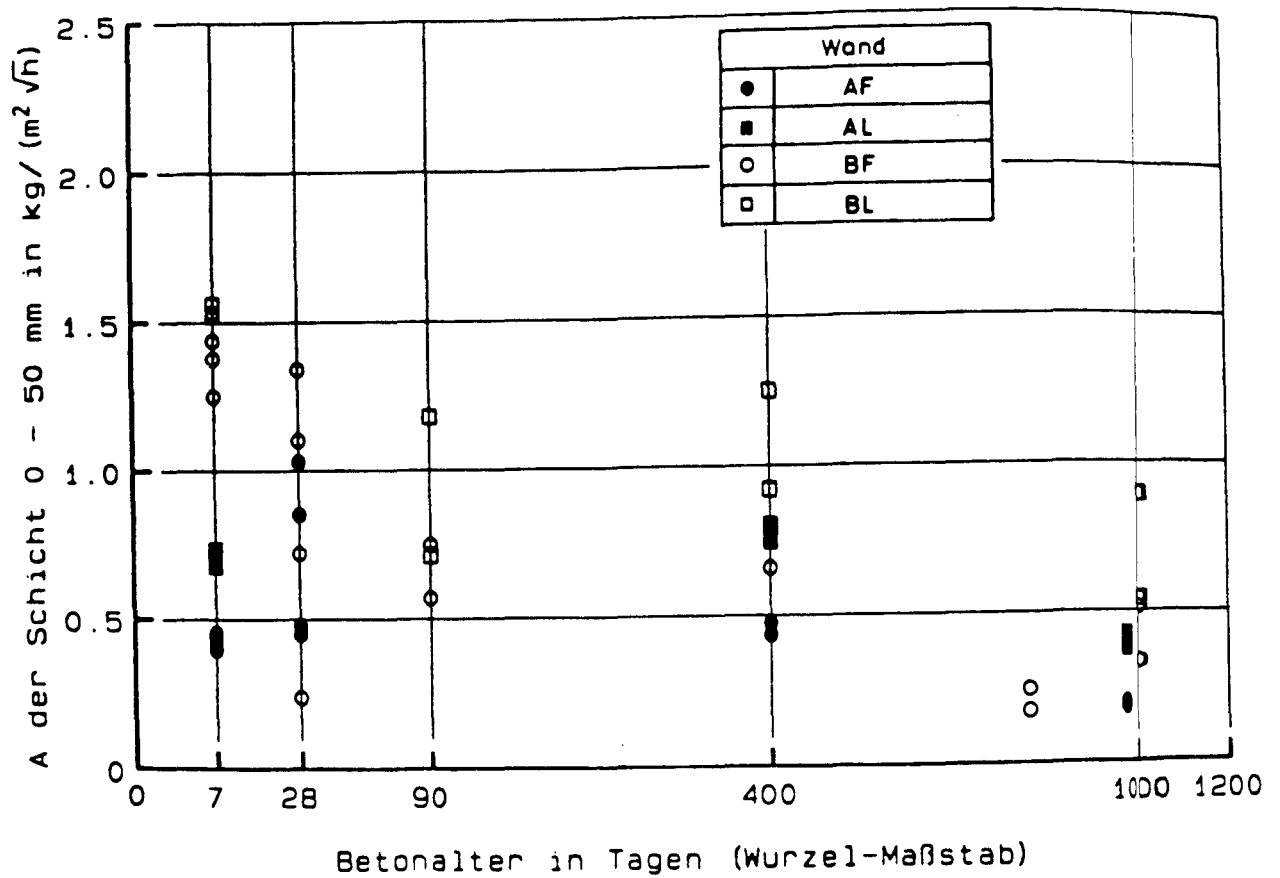


Bild D92

Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) getrennt für die Wände A und B sowie die verschiedenen Lagerungsbedingungen.

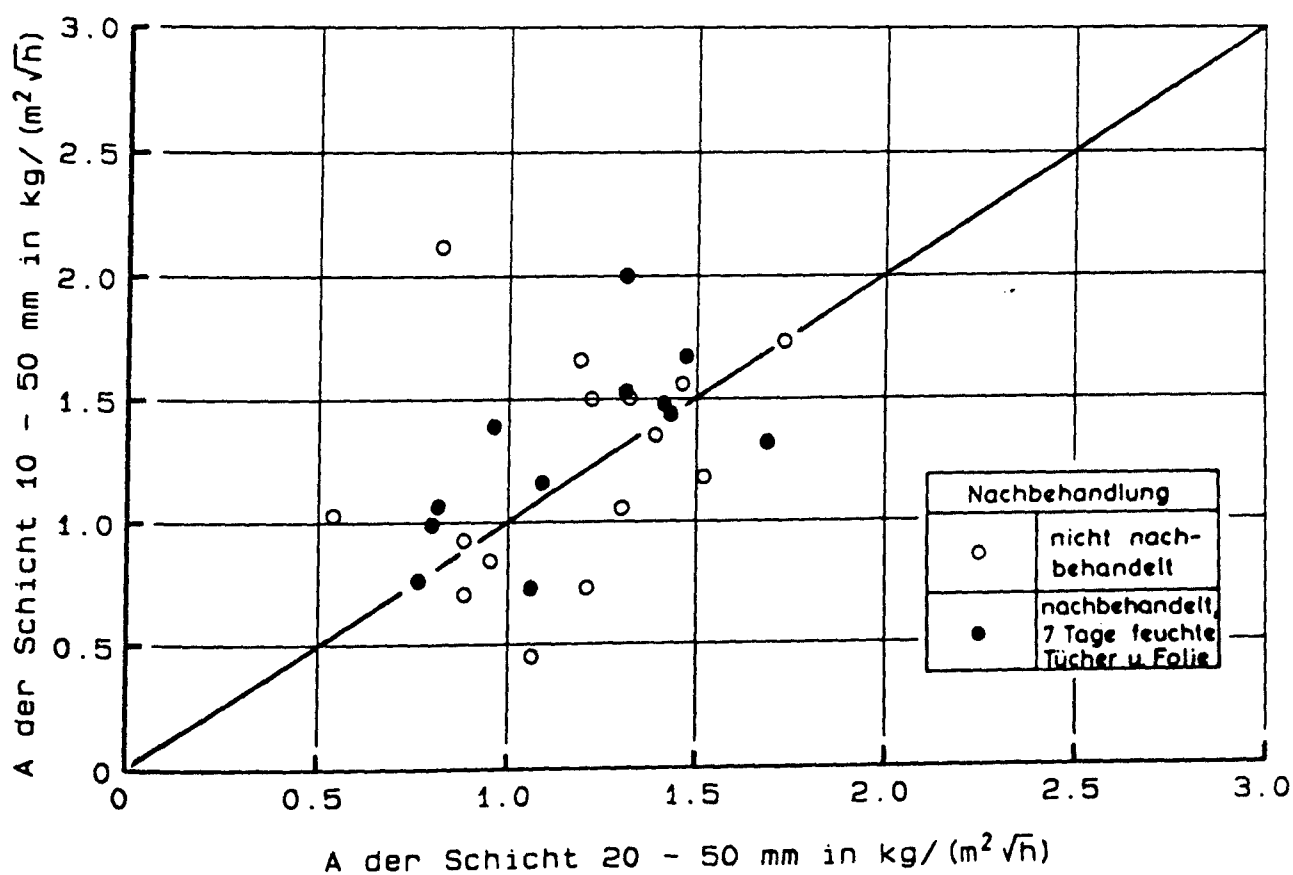
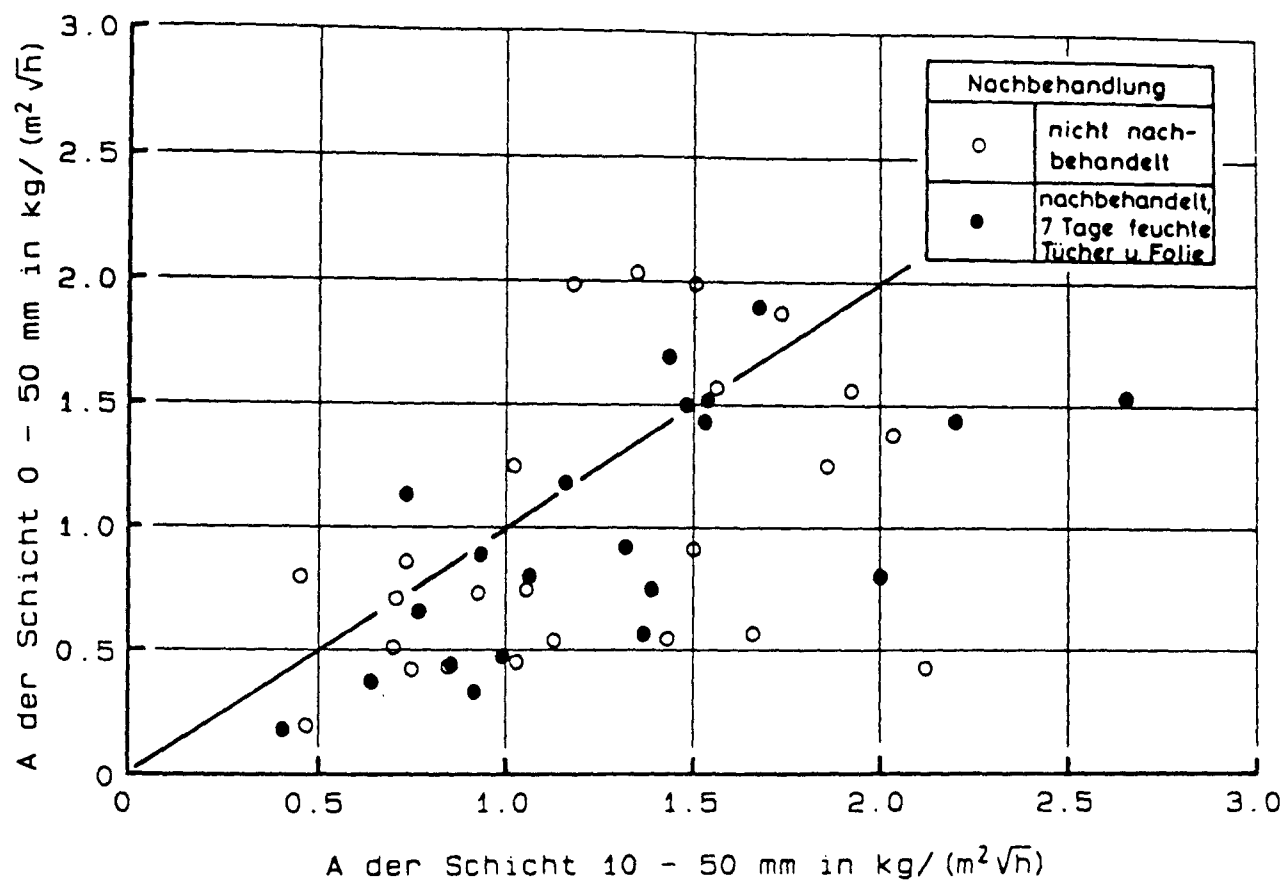


Bild D93

Vergleich der Wasseraufnahmekoeffizienten von Proben aus verschiedenen Wandtiefenbereichen (Werte aller Wände getrennt nach der Art der Nachbehandlung).

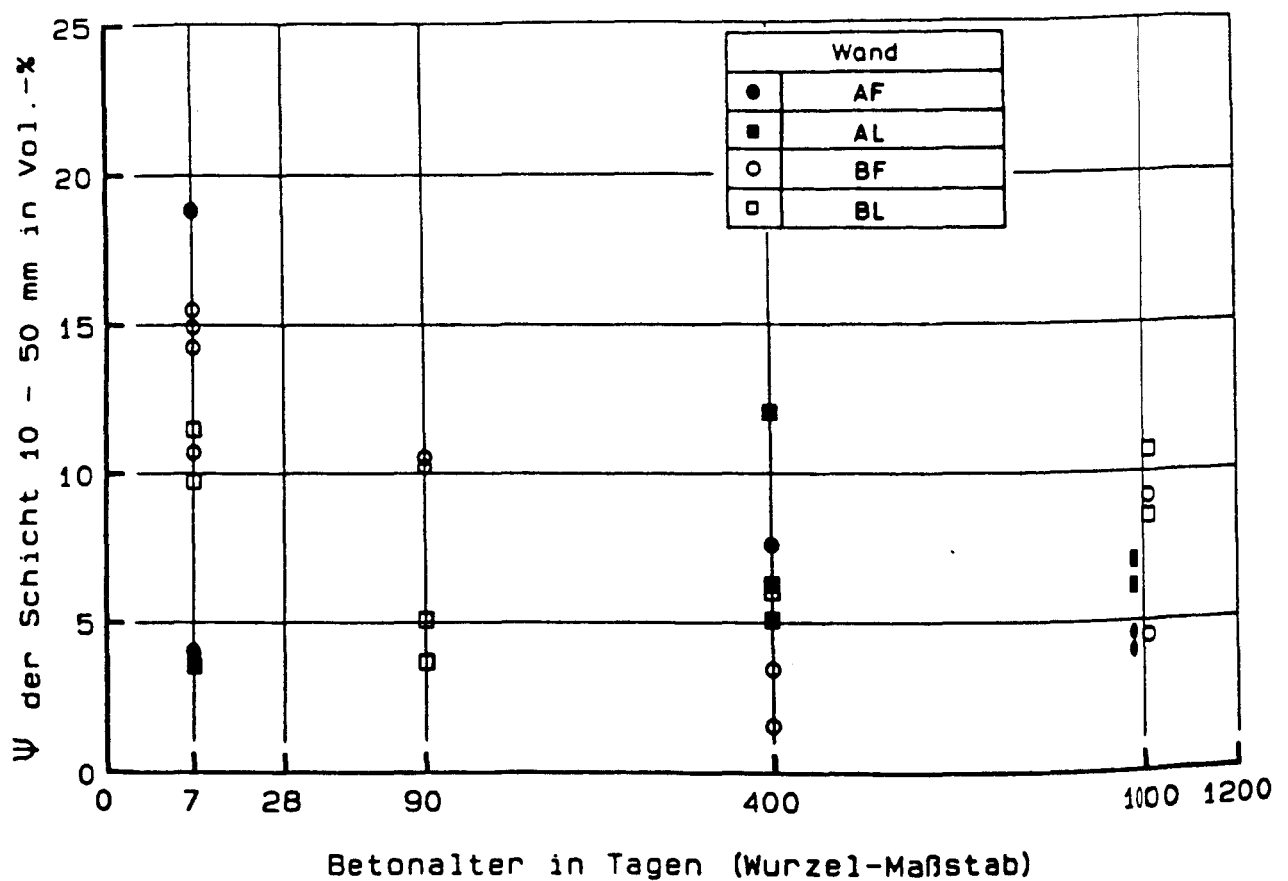
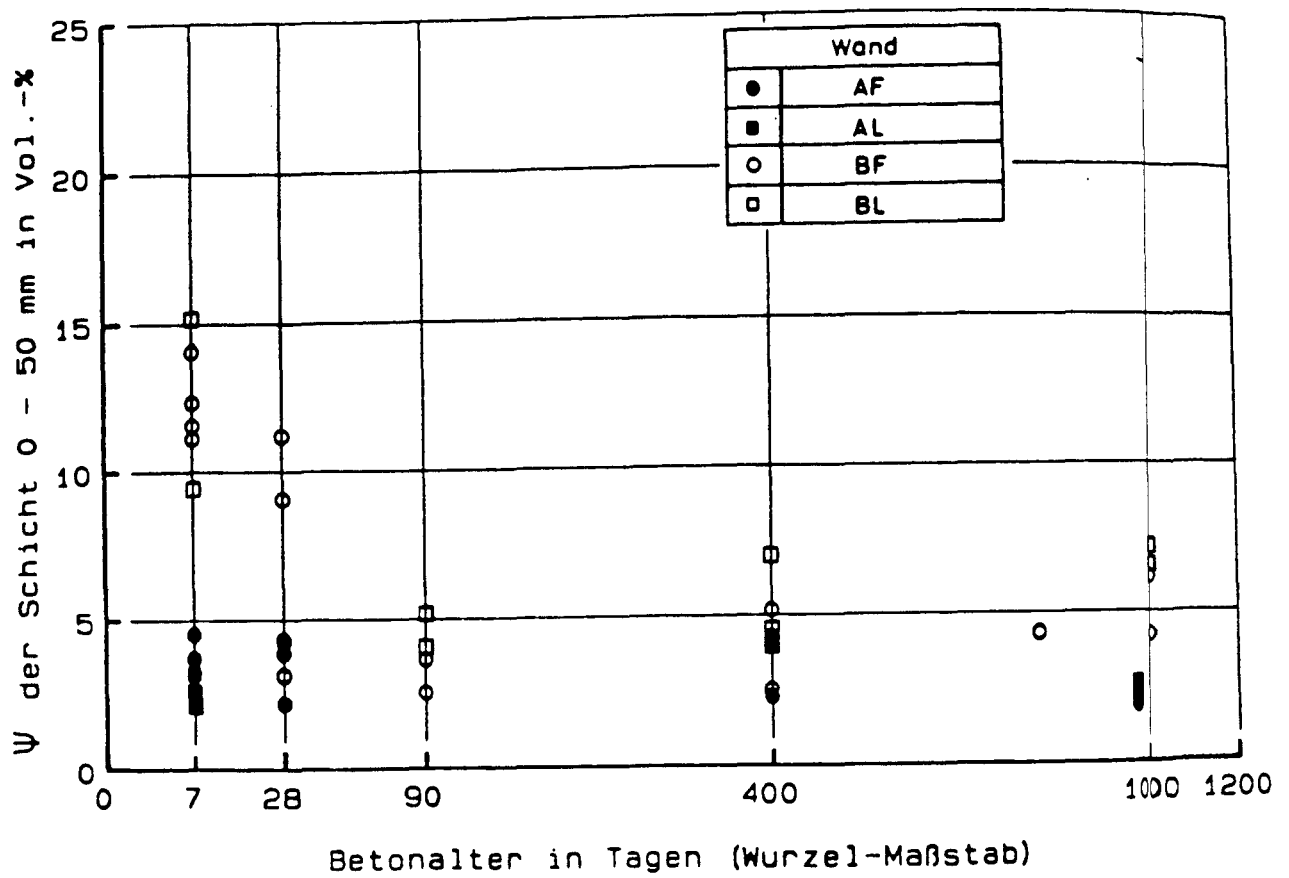


Bild D94

Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) getrennt für die Wände A und B sowie die verschiedenen Lagerungsbedingungen.

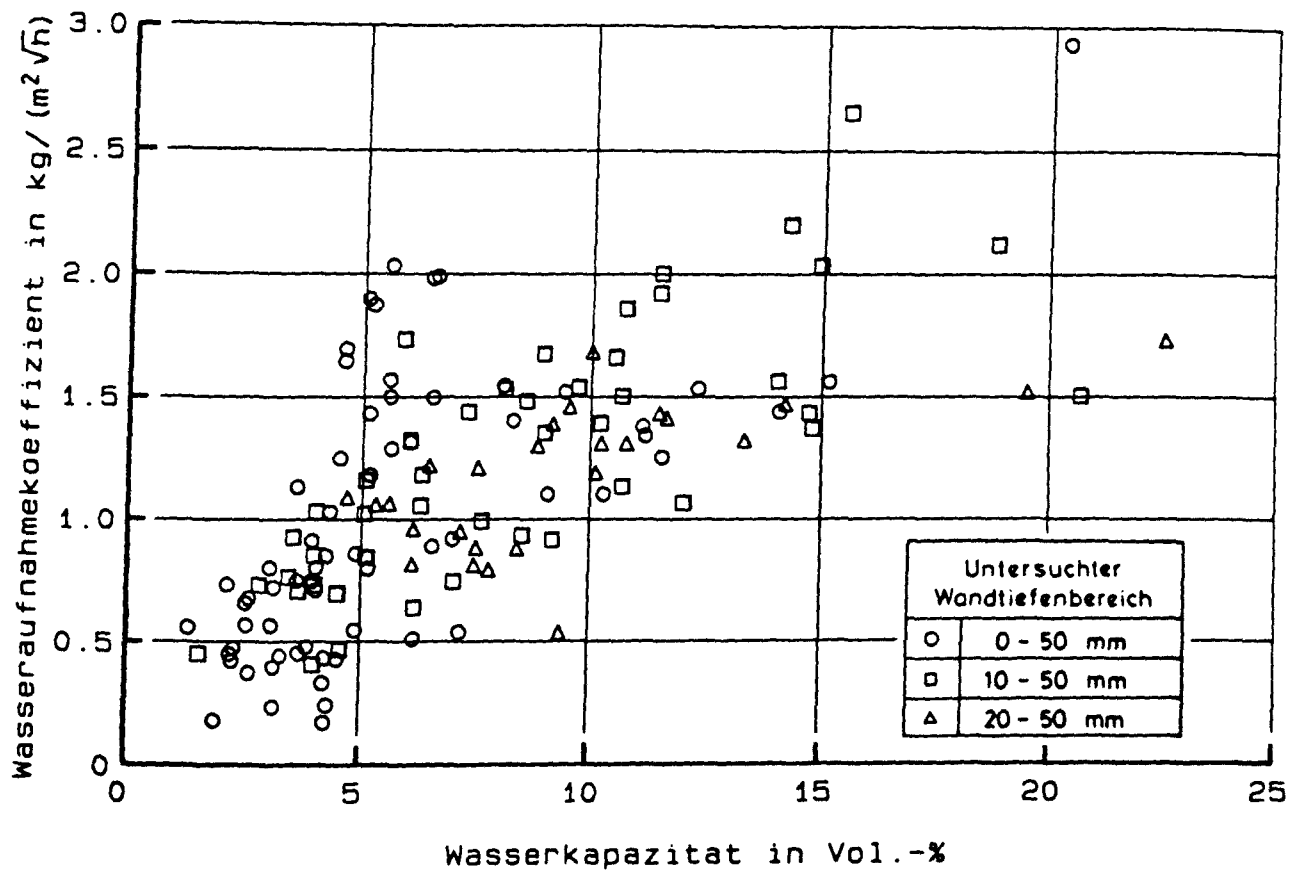
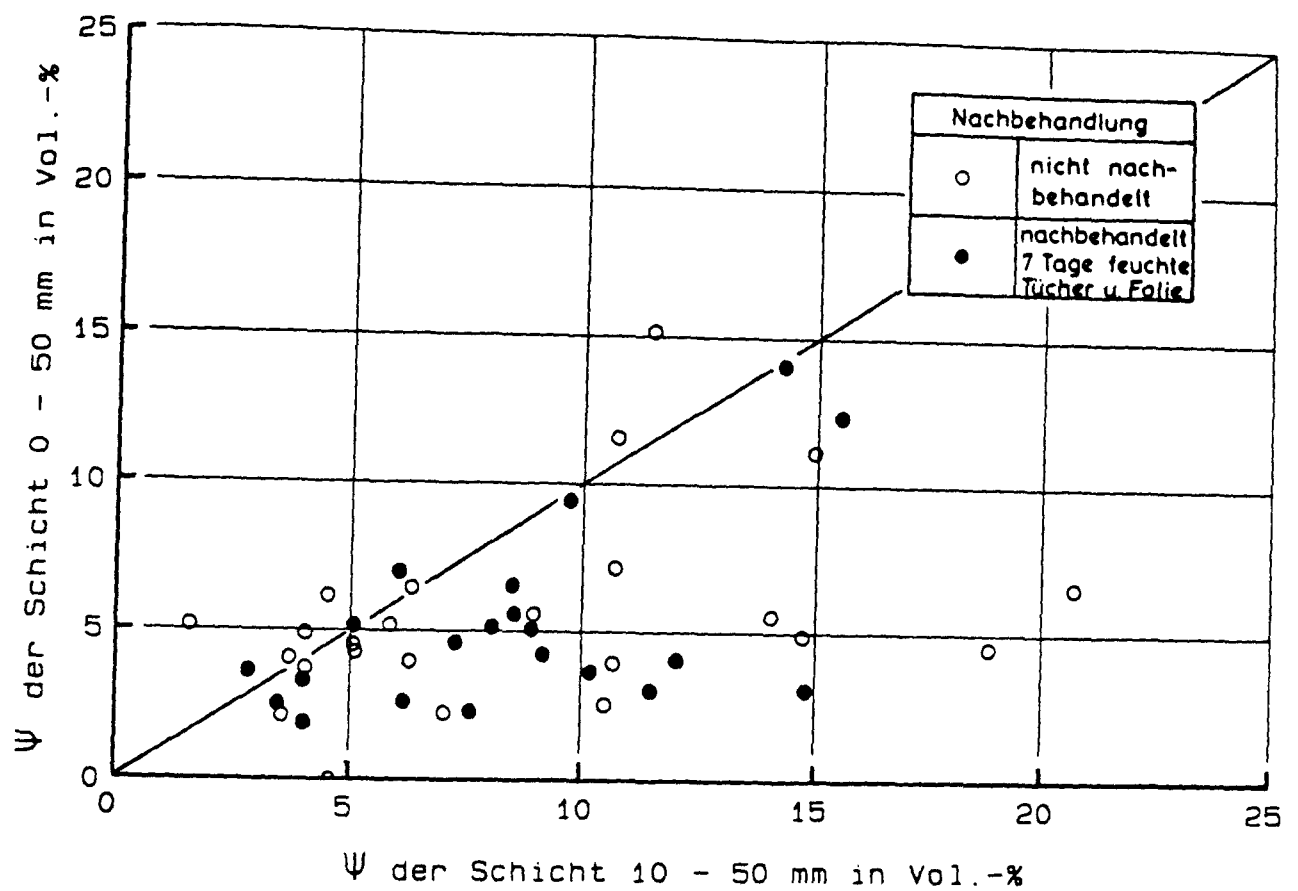


Bild D95

Obere Bildhälfte: Vergleich der Wasserkapazitäten verschiedener Wandtiefenbereiche aller Wände A - D.
 Untere Bildhälfte: Abhängigkeit zwischen Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität für Proben unterschiedlicher Wandtiefenbereiche.

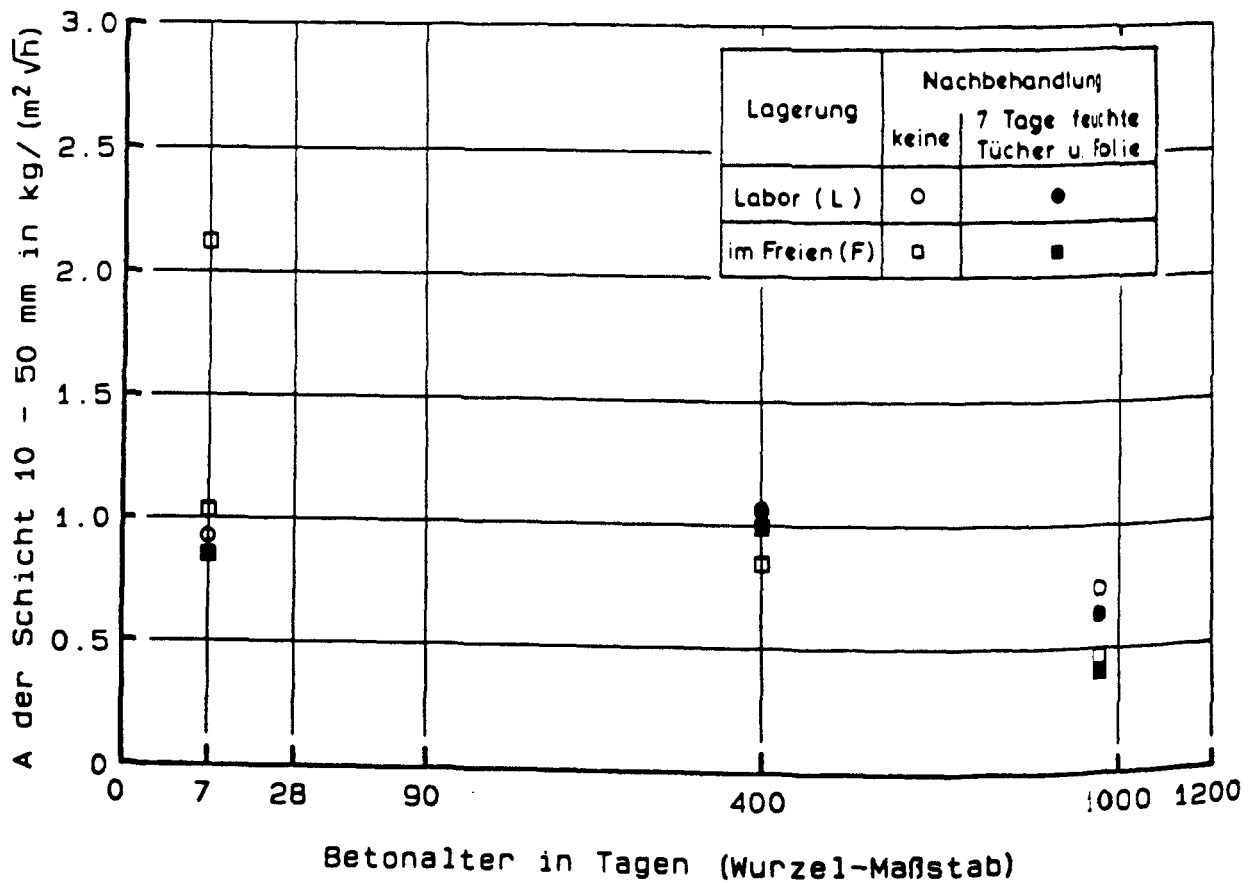
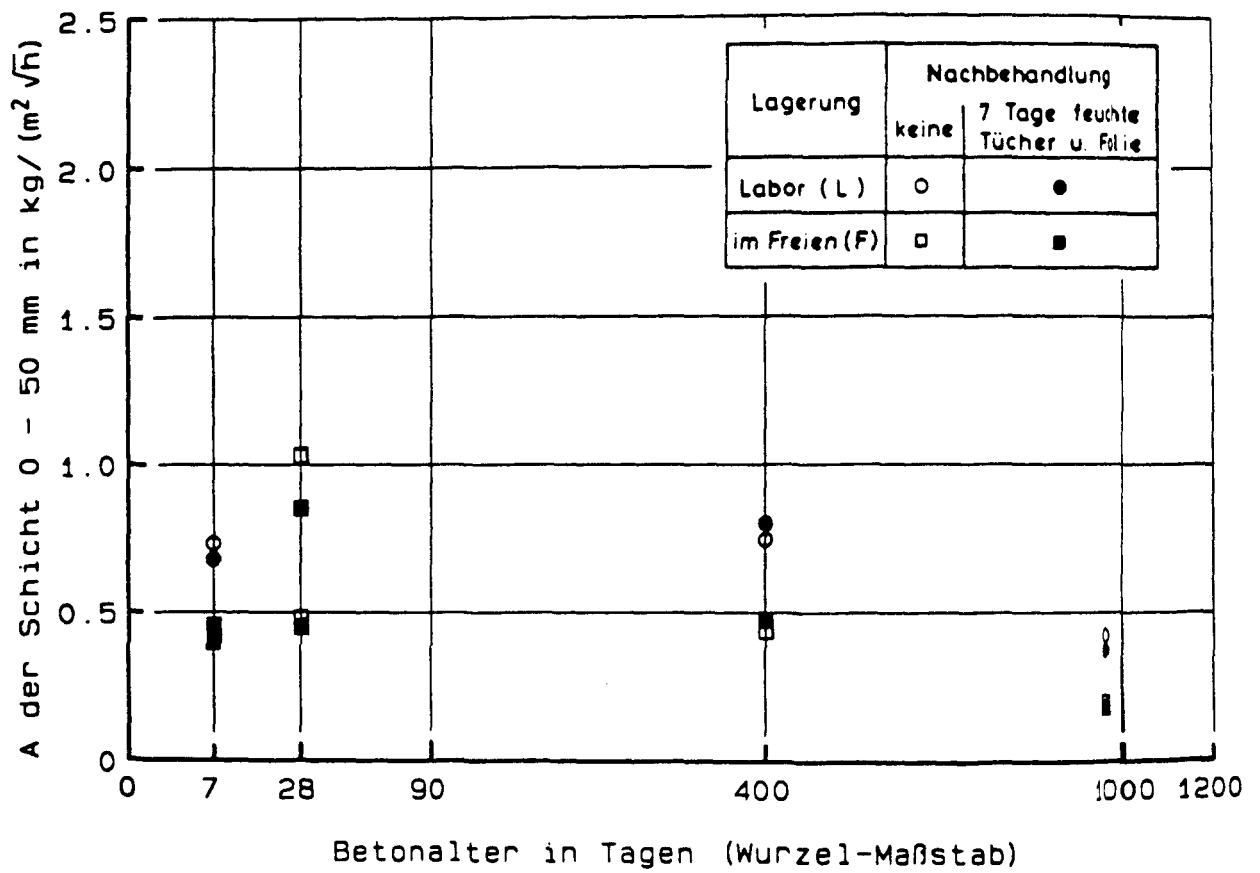


Bild D96

Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) von Wandpaar A für die verschiedenen Arten der Nachbehandlung.

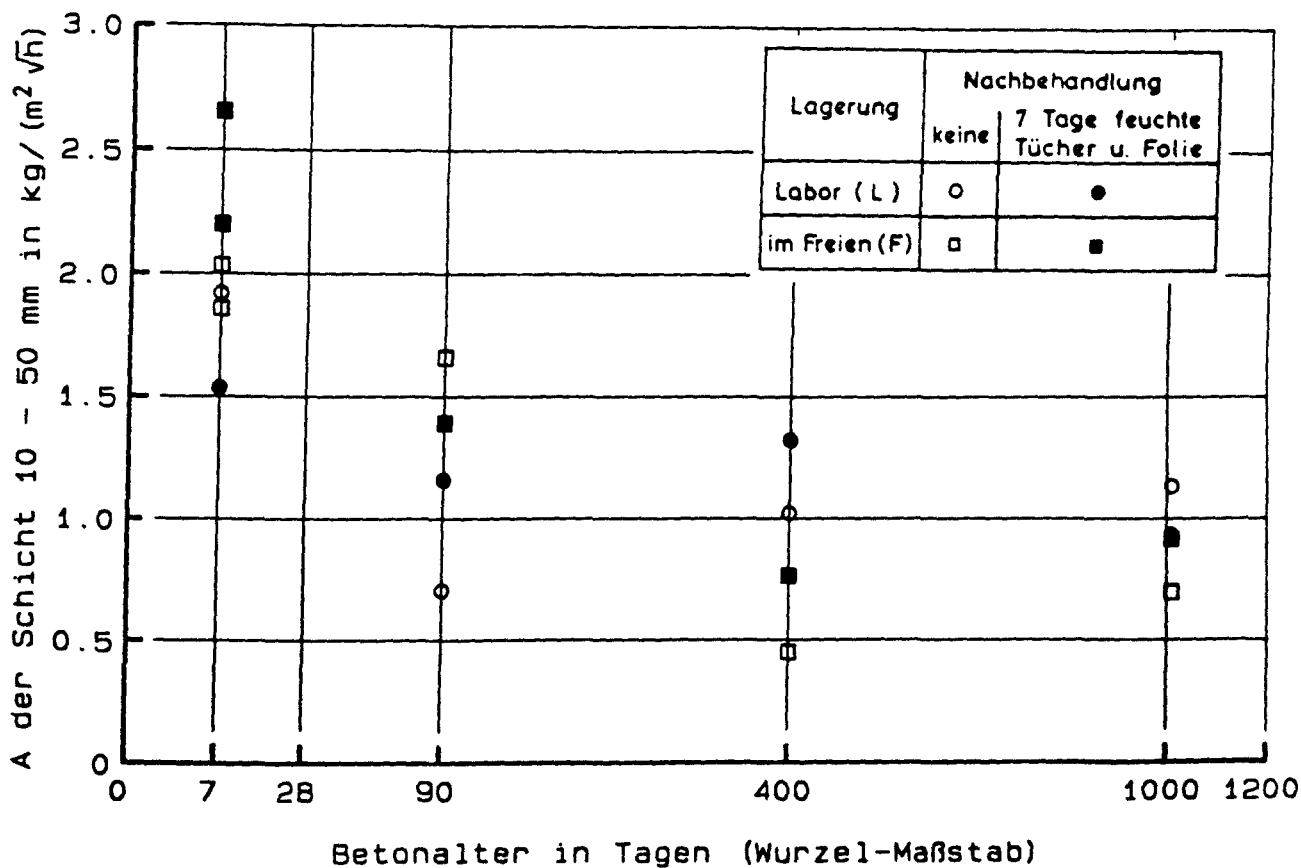
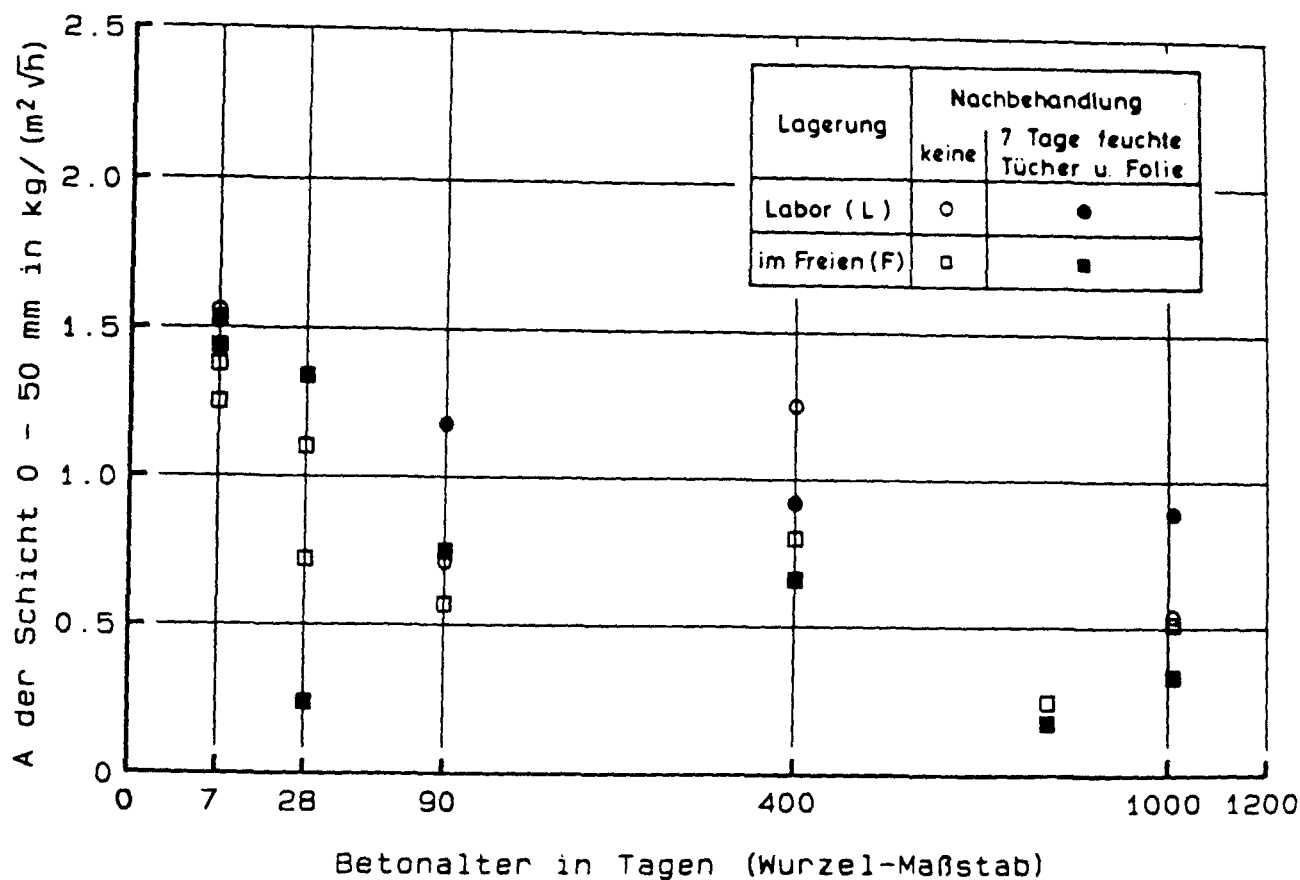


Bild D97

Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) von Wandpaar B für die verschiedenen Arten der Nachbehandlung.

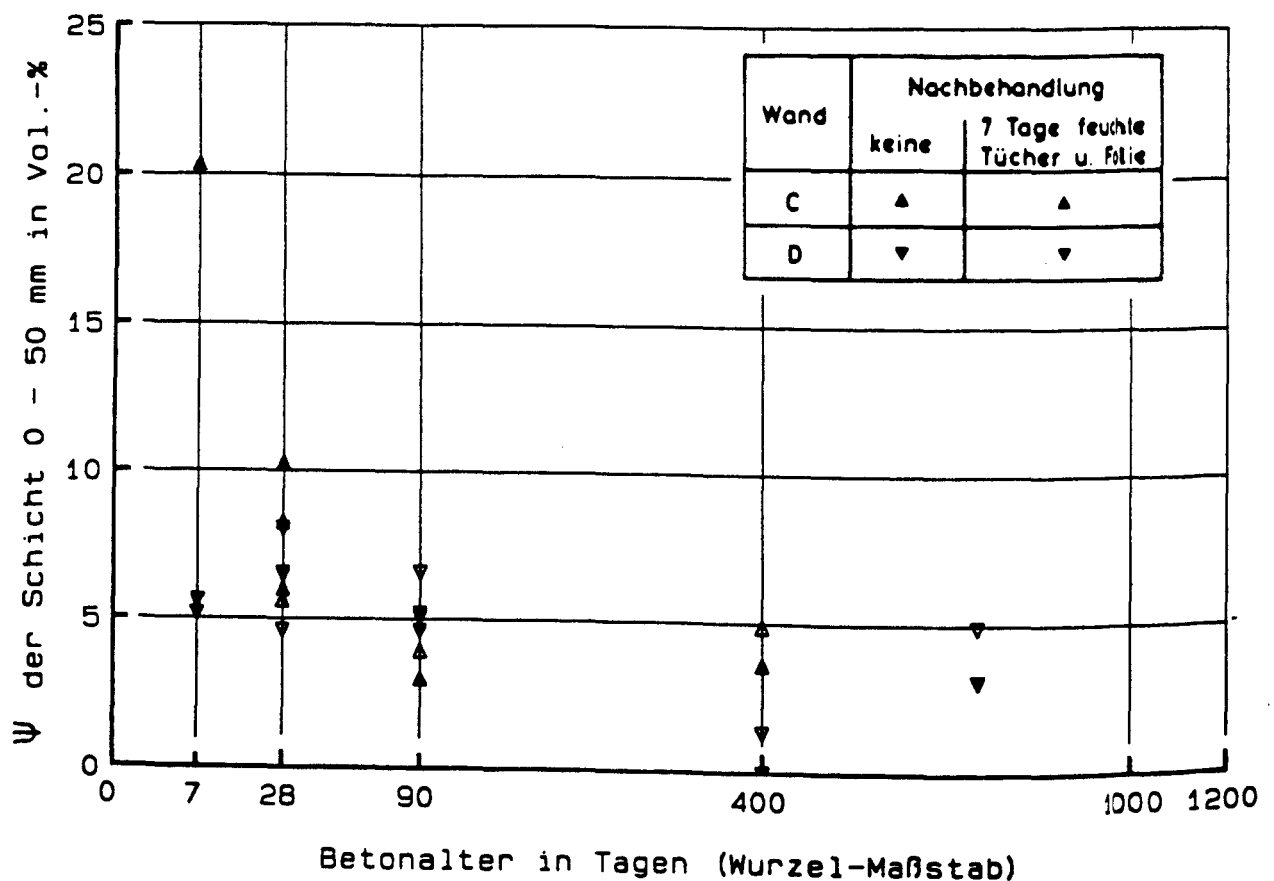
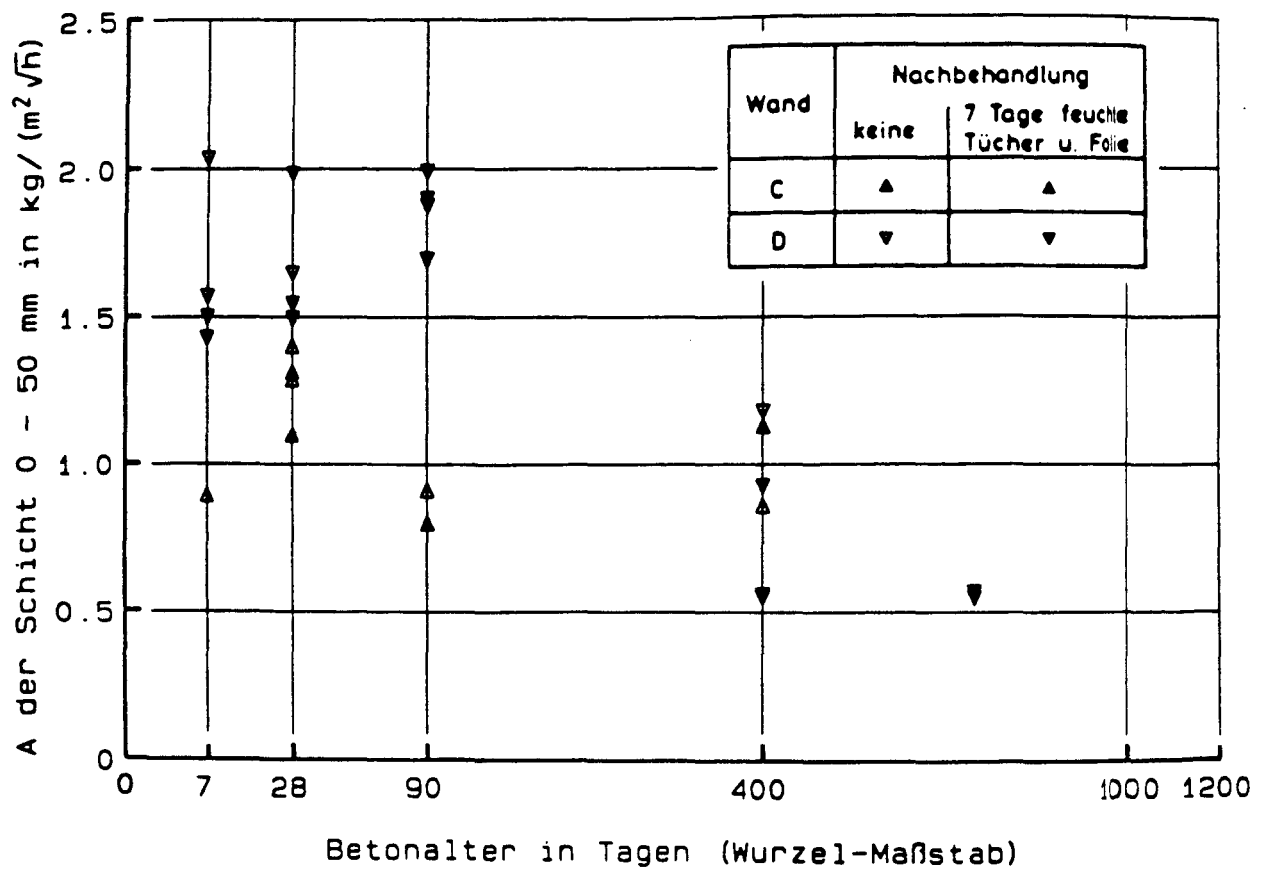


Bild D98

Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten und der Wasserkapazität der Proben des Wandtiefenbereiches 0 - 50 mm der Wände C und D getrennt nach den unterschiedlichen Arten der Nachbehandlung.

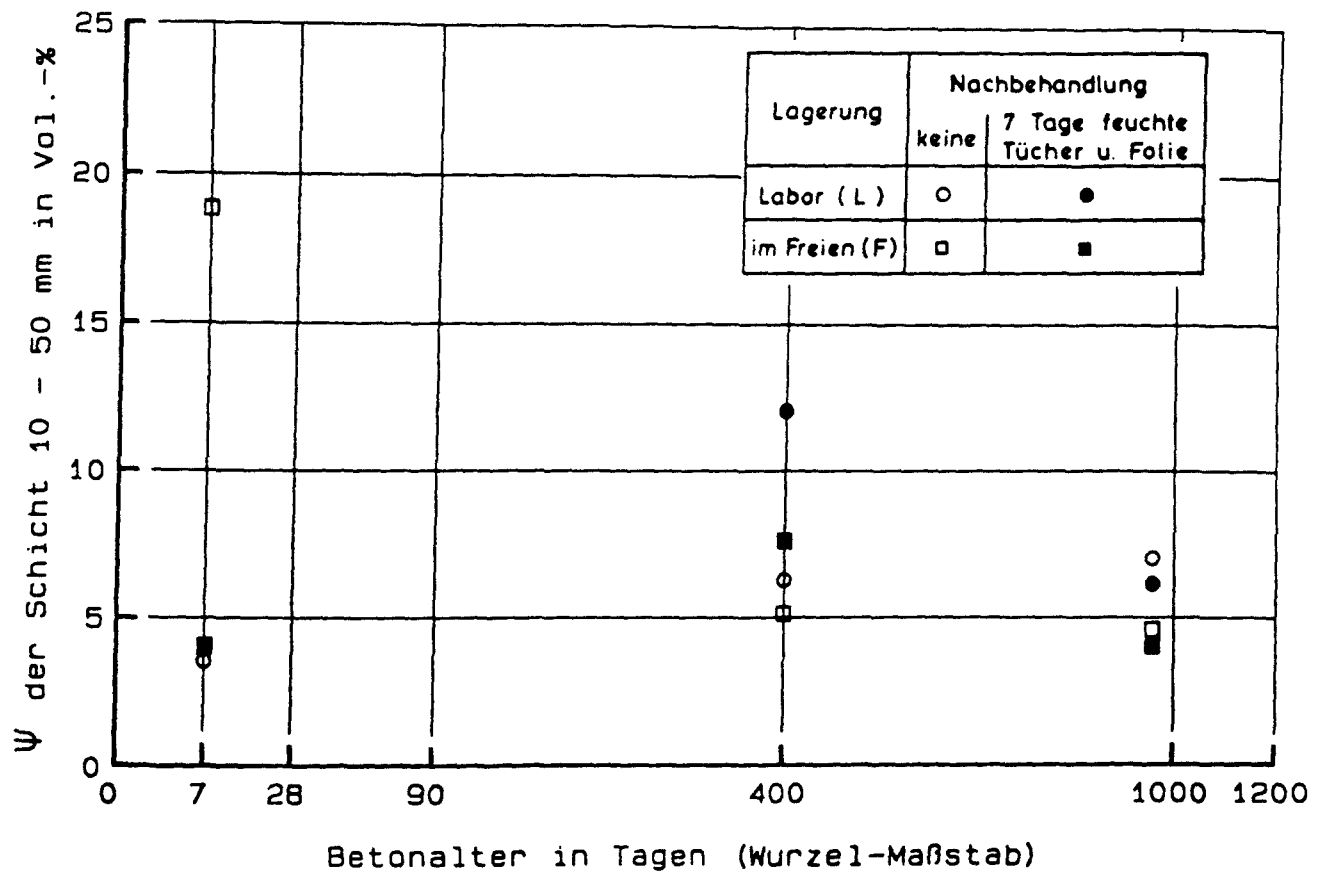
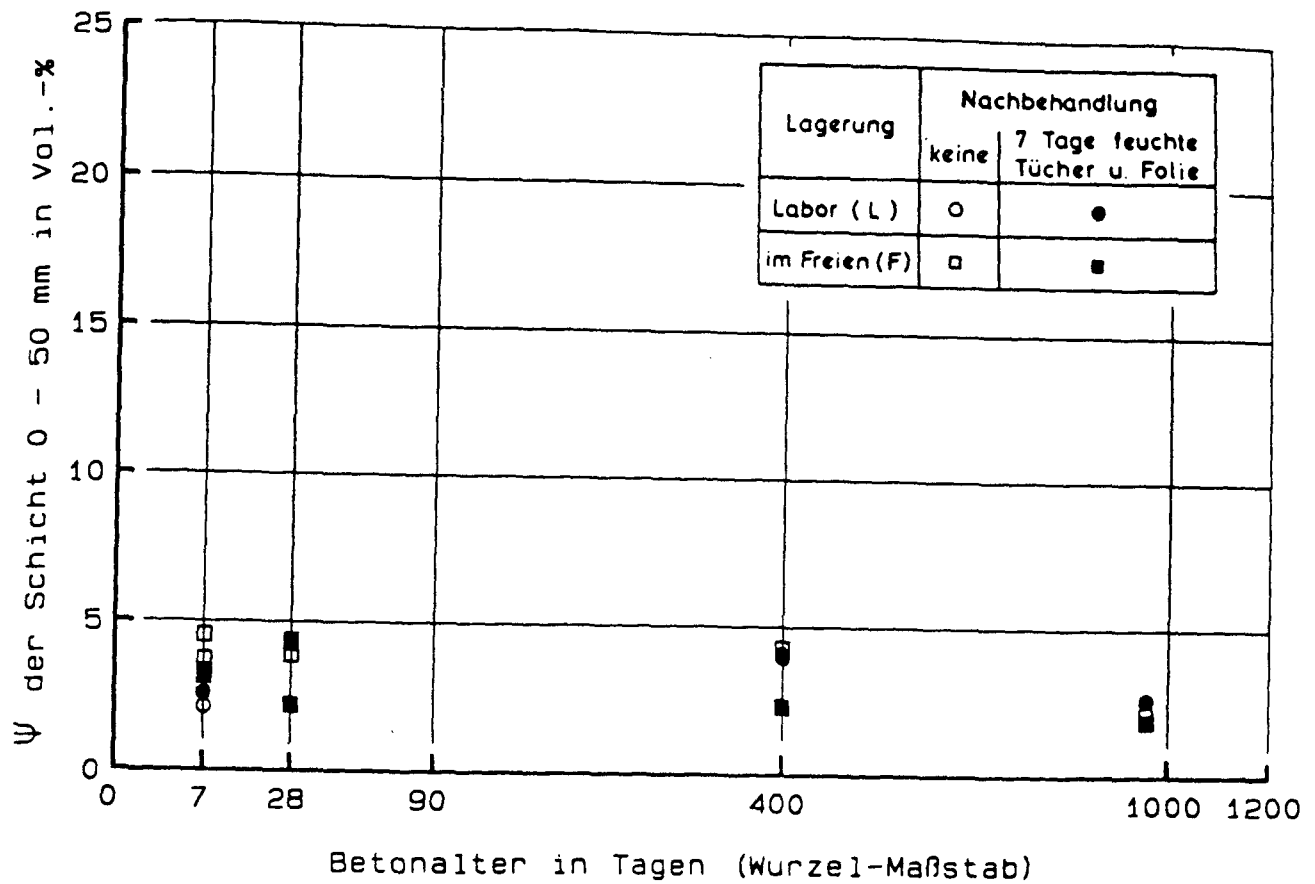


Bild D99

Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) von Wandpaar A für die verschiedenen Arten der Nachbehandlung.

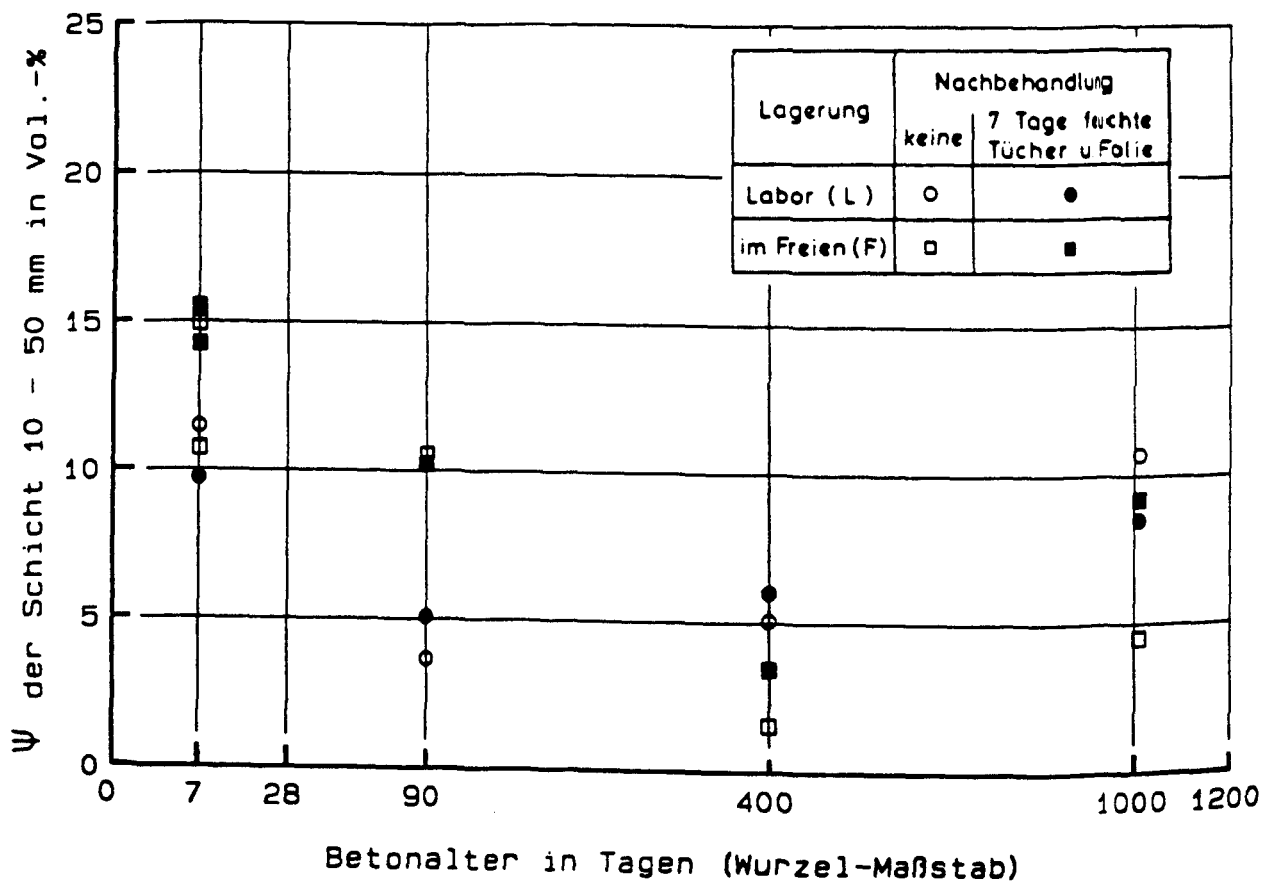
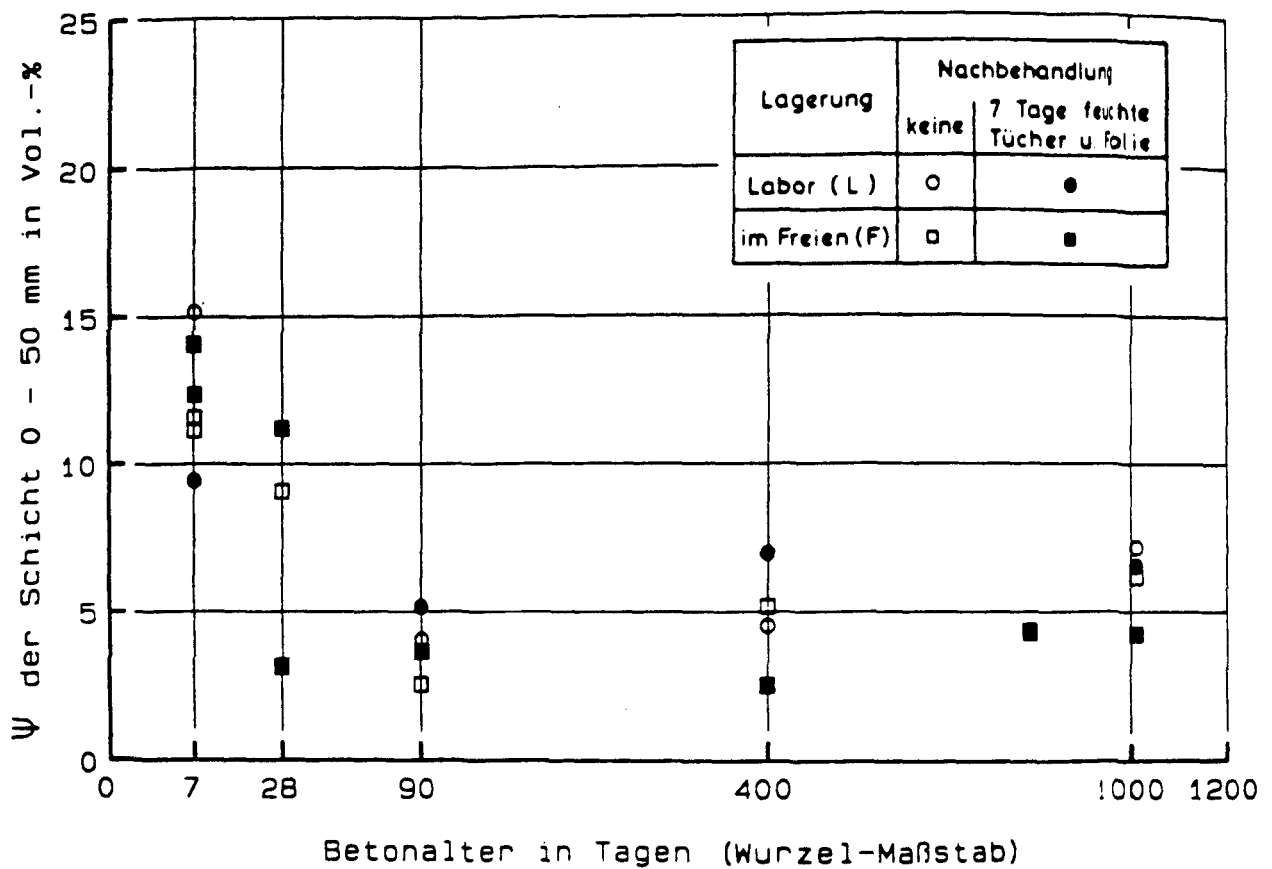


Bild D100

Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) von Wandpaar B für die verschiedenen Arten der Nachbehandlung.

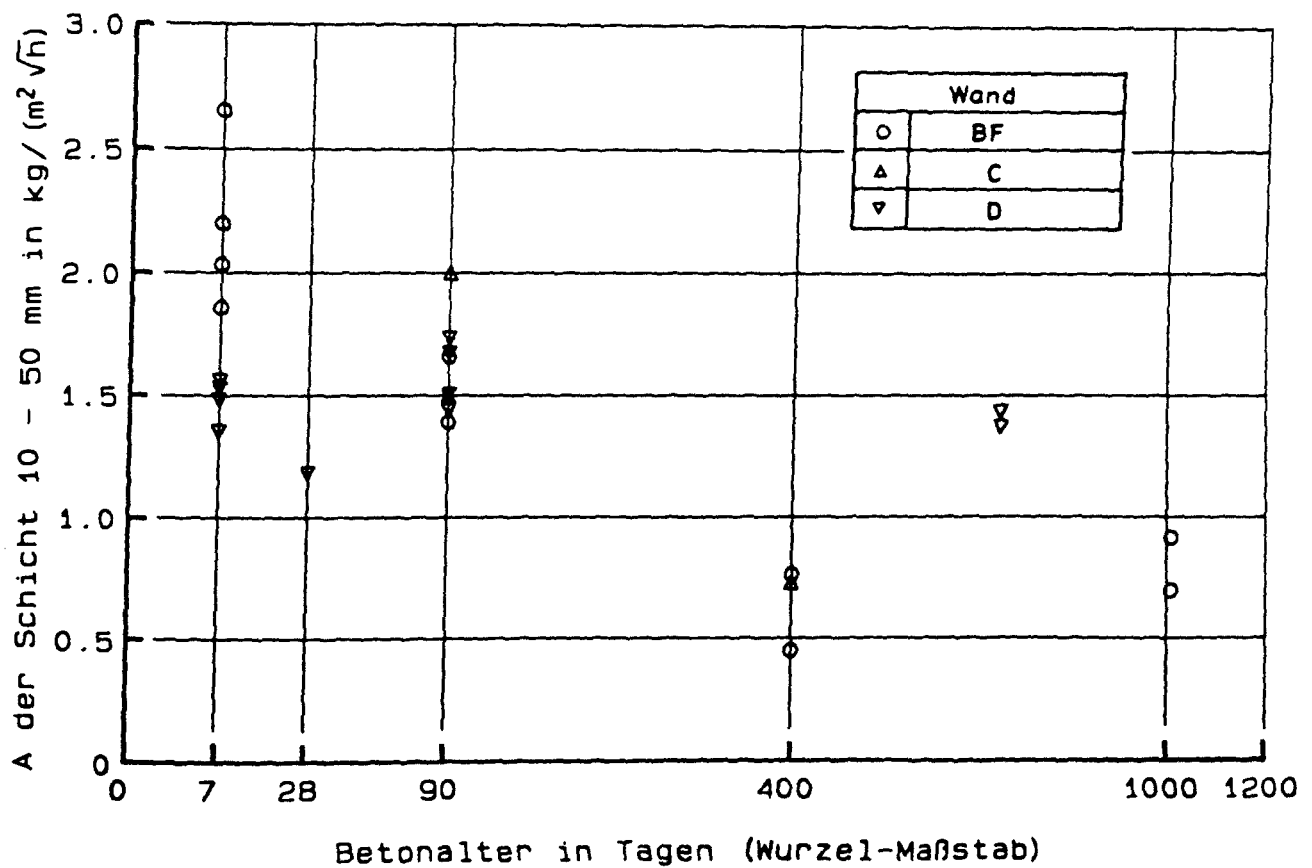
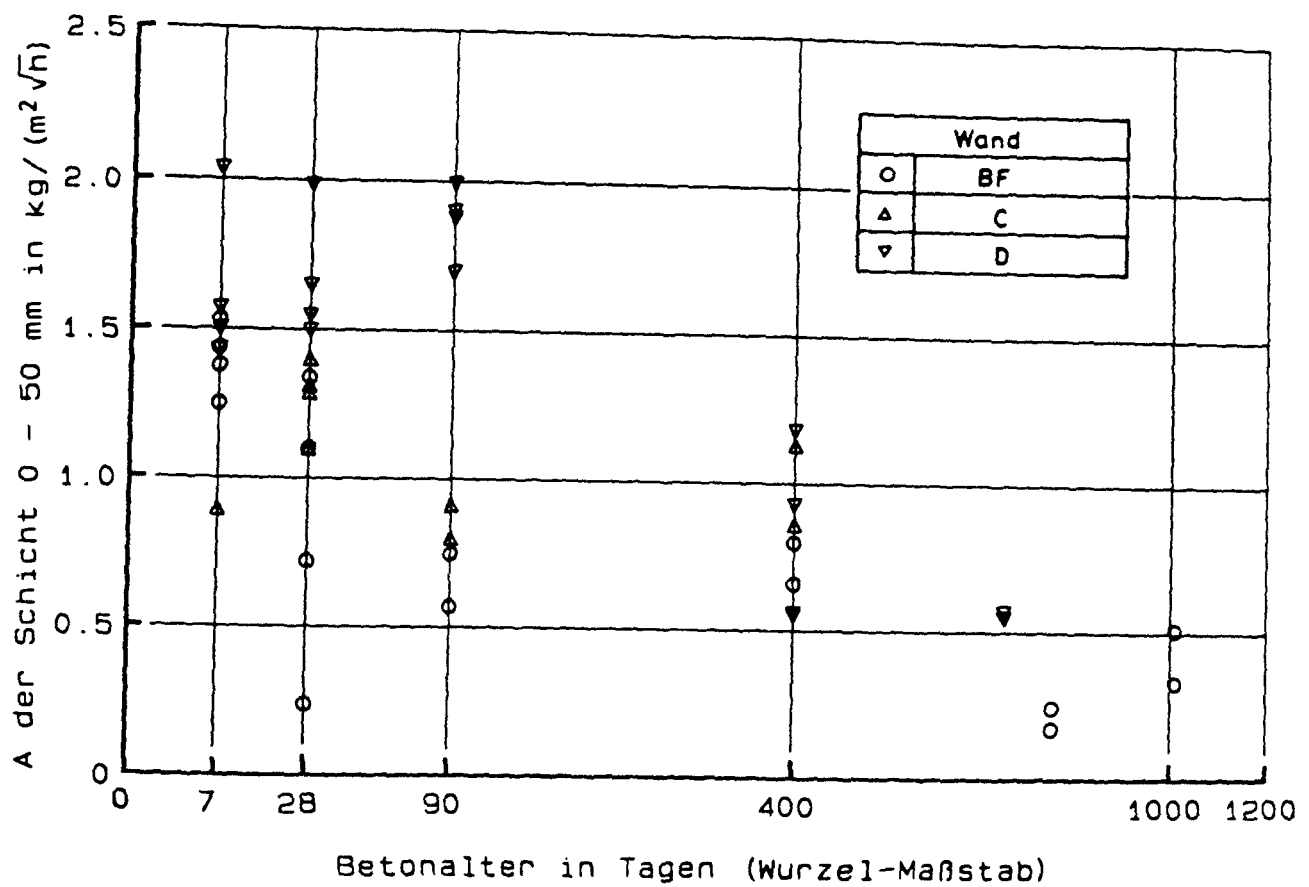


Bild D101

Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben der Tiefe 0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) der Wände BF, C und D.

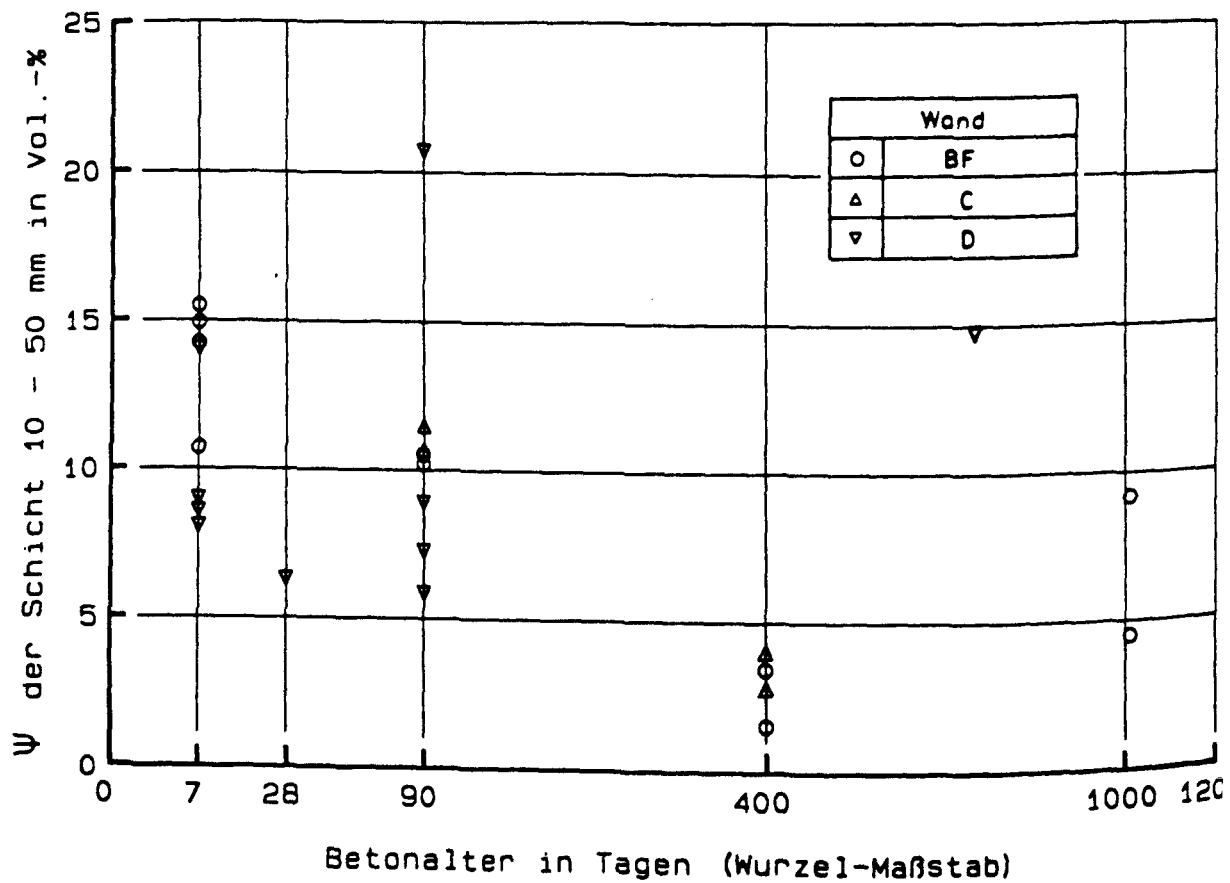
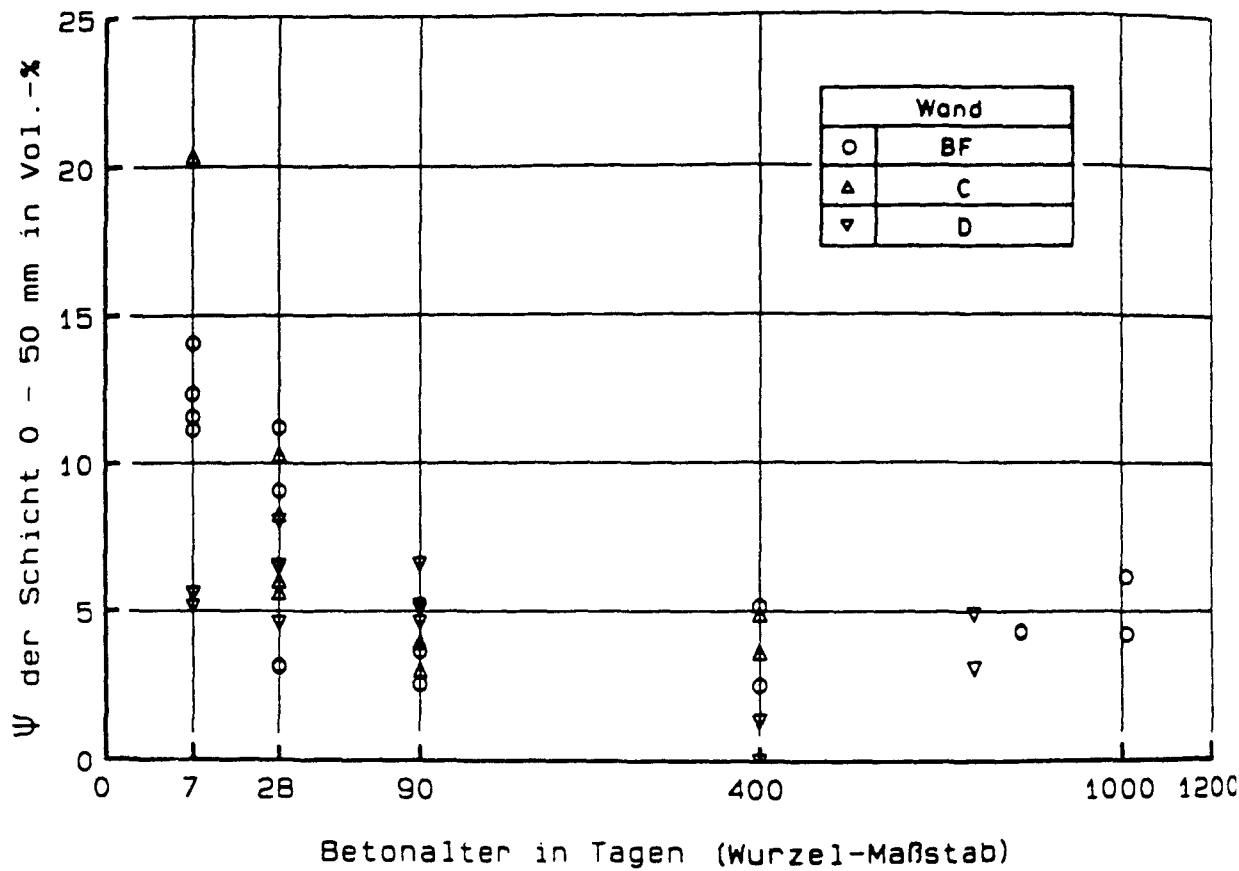


Bild D102

Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität der Proben der Tiefe
0 - 50 mm (oben) und 10 - 50 mm (unten) der Wände BF, C und D.

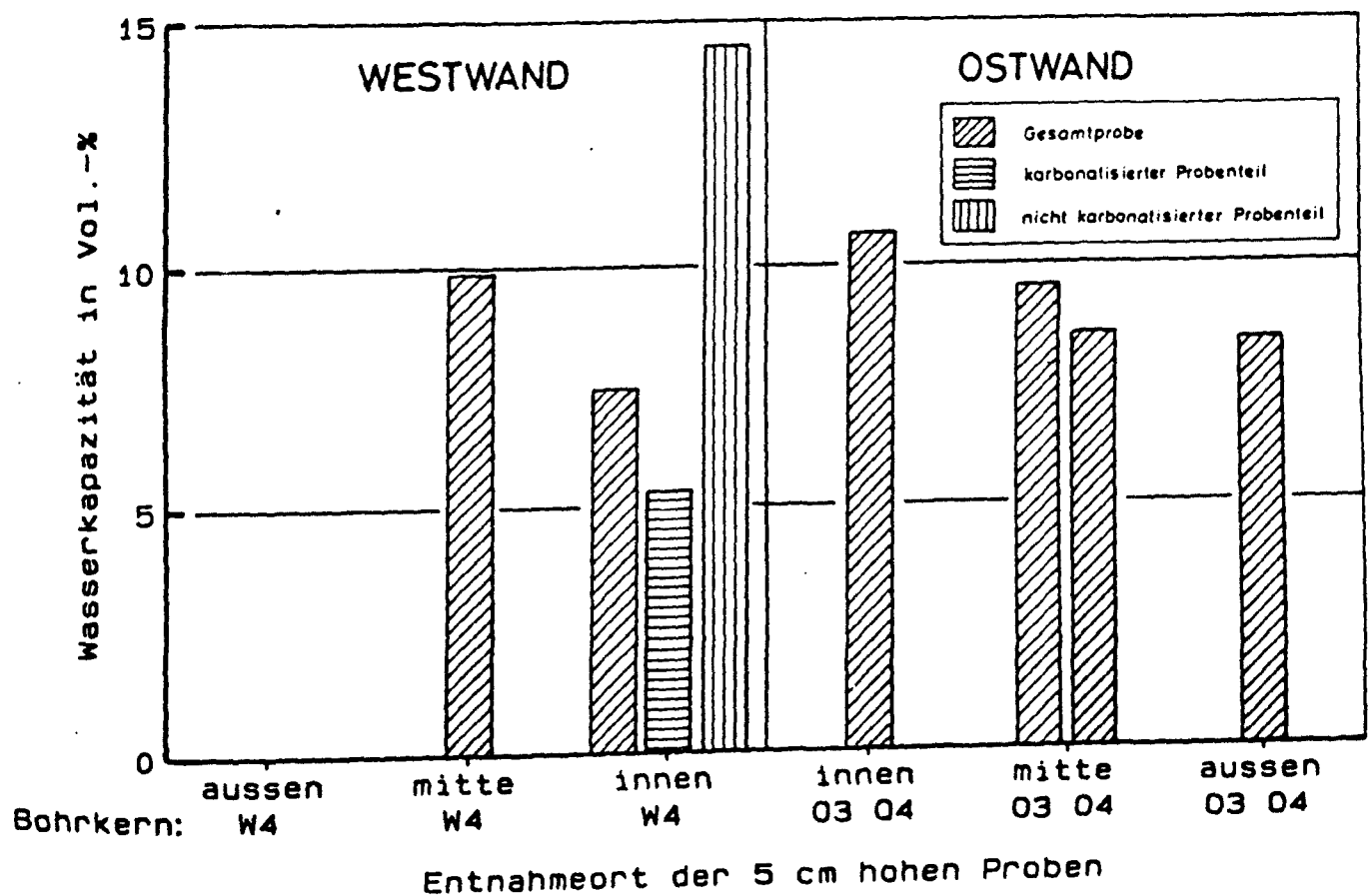
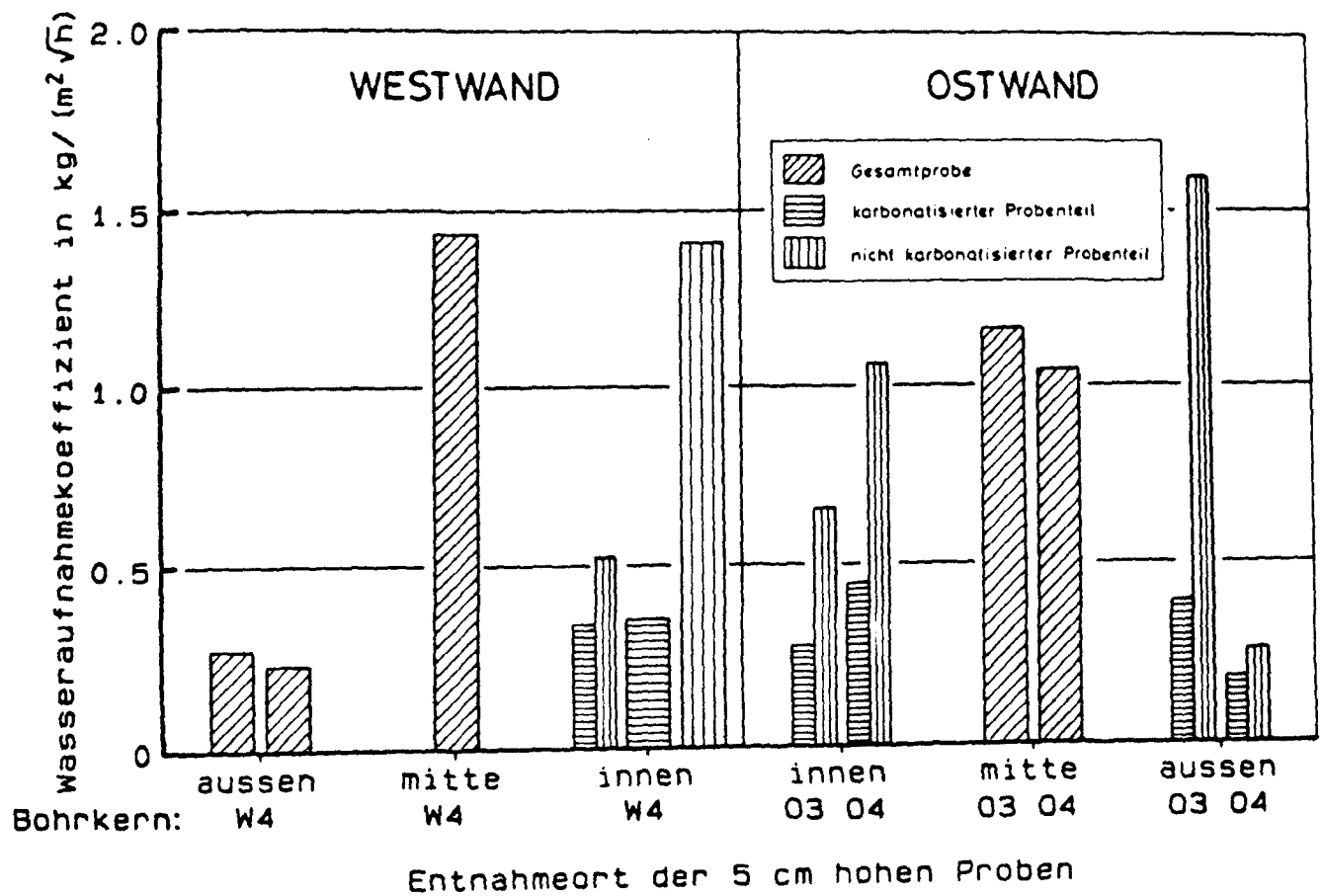


Bild D103

Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität der verschiedenen Tiefenbereichen der West- und Ostwand entnommenen Proben des Versuchshauses 1 (nähere Erläuterungen zur Legende siehe Abschnitt D 3.2.2), PZ 275.

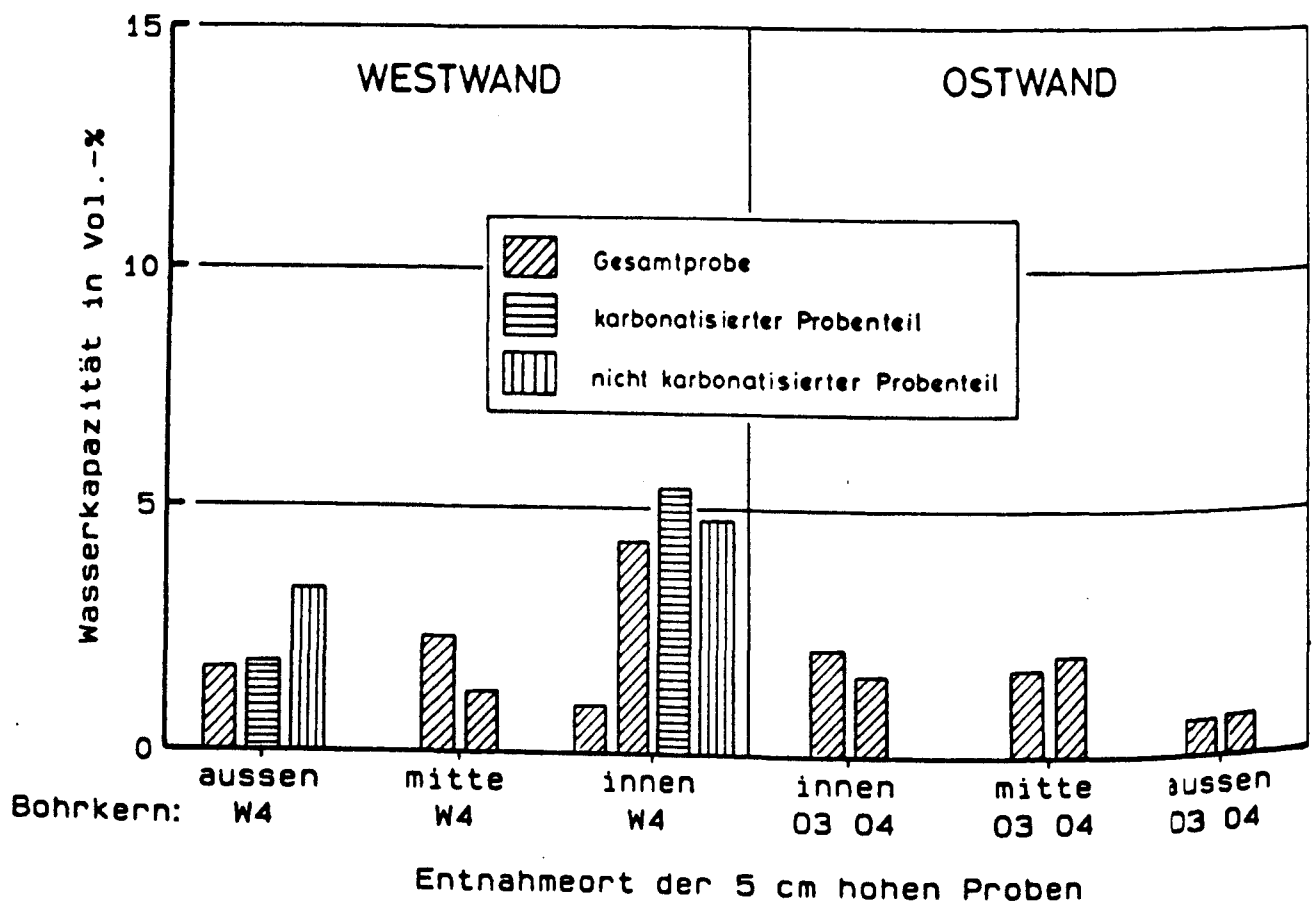
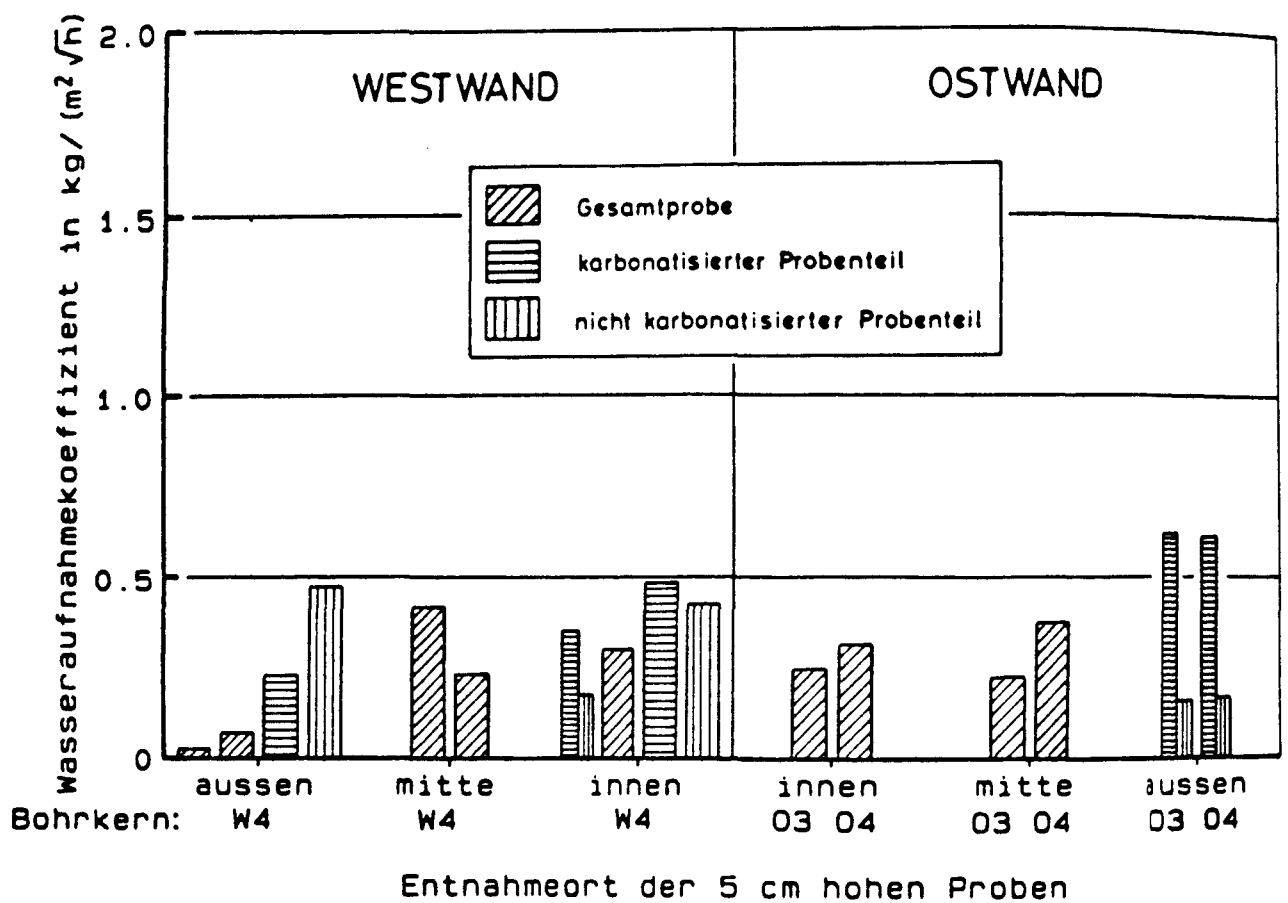


Bild D104

Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität der verschiedenen Tiefenbereichen der West- und Ostwand entnommenen Proben des Versuchshauses 2 (nähere Erläuterungen zur Legende siehe Abschnitt D 3.2.2), H0Z 275.

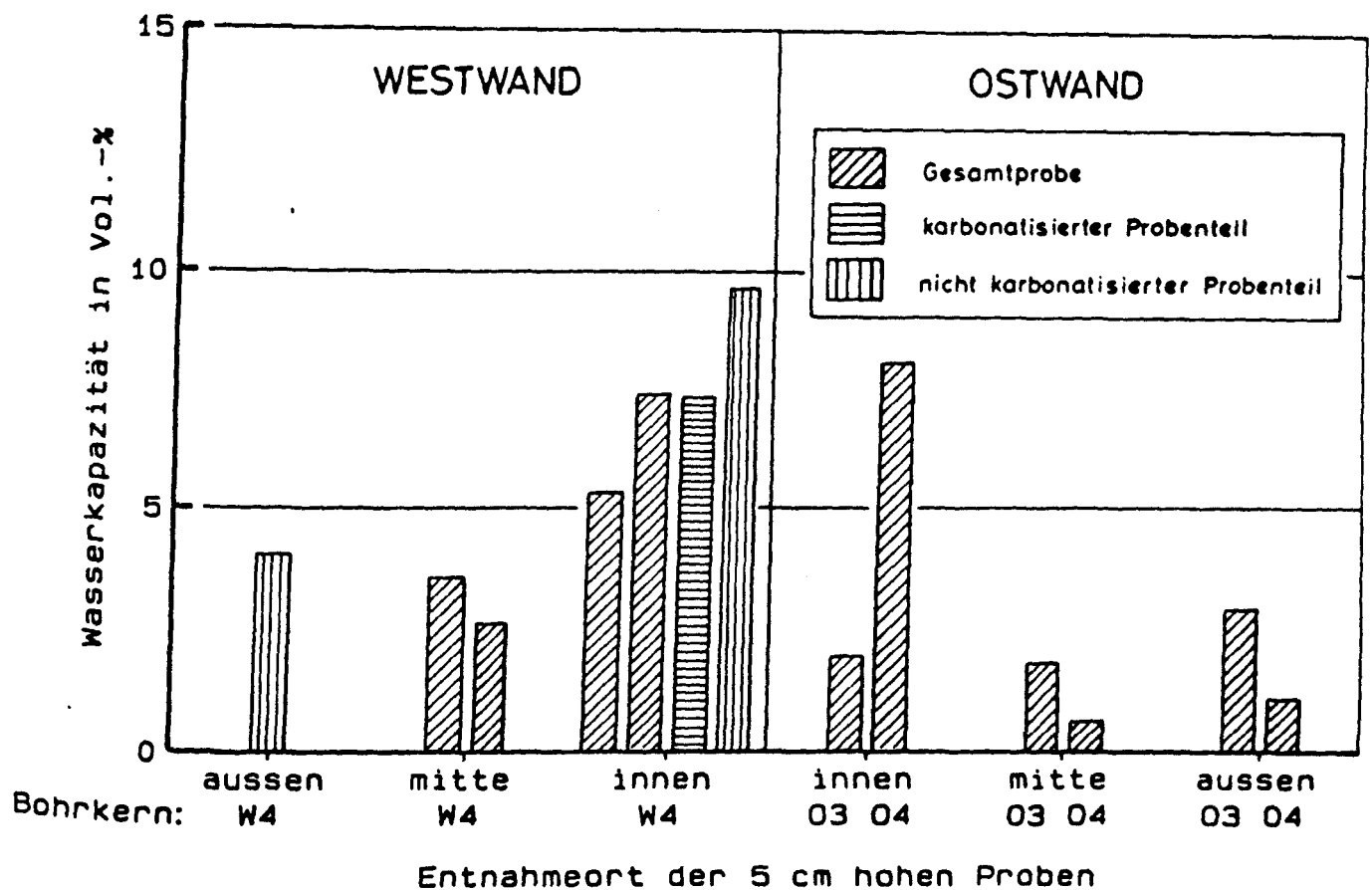
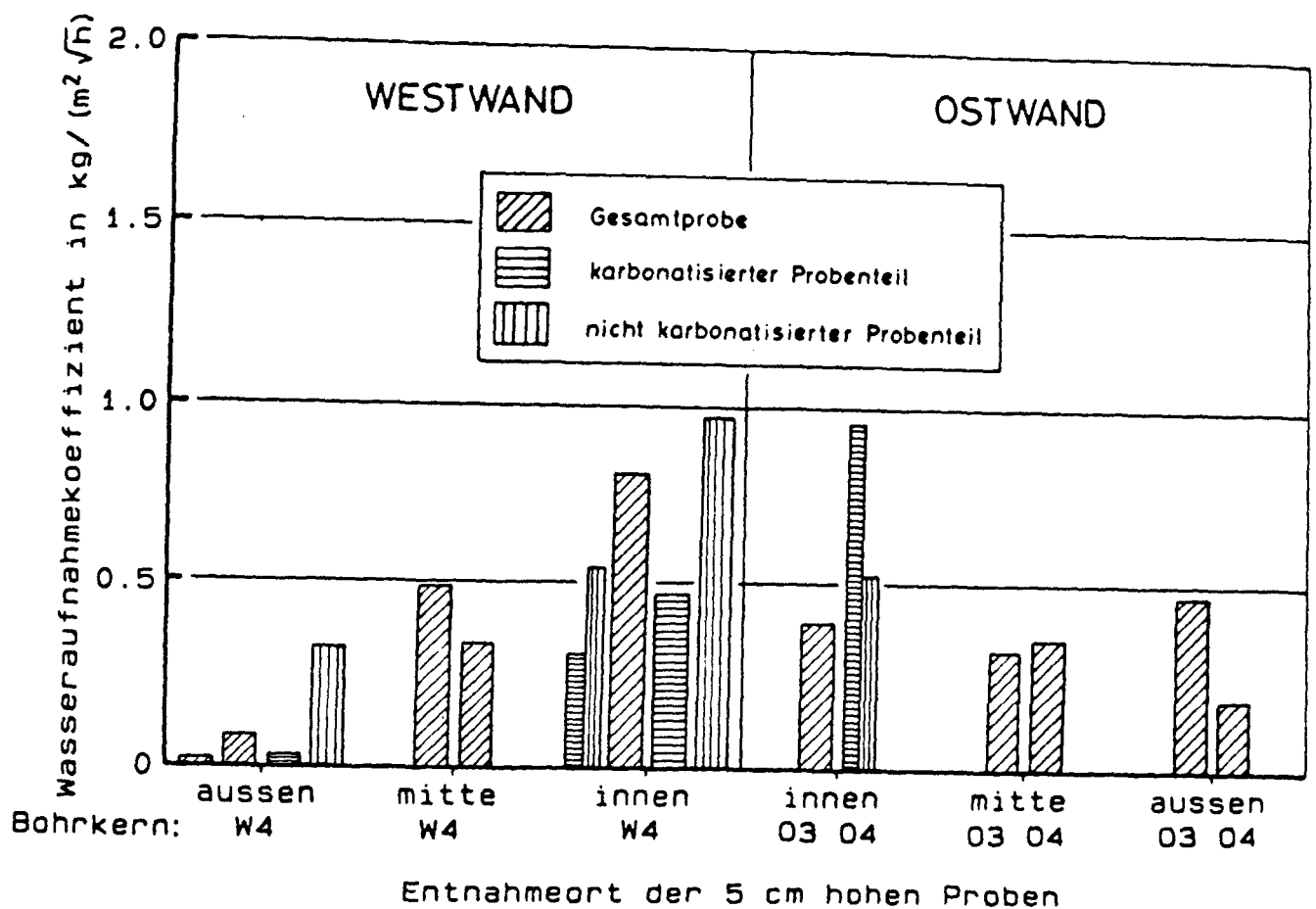


Bild D105

Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität der verschiedenen Tiefenbereichen der West- und Ostwand entnommenen Proben des Versuchshauses 3 (nähere Erläuterungen zur Legende siehe Abschnitt D 3.2.2), HOZ 275.

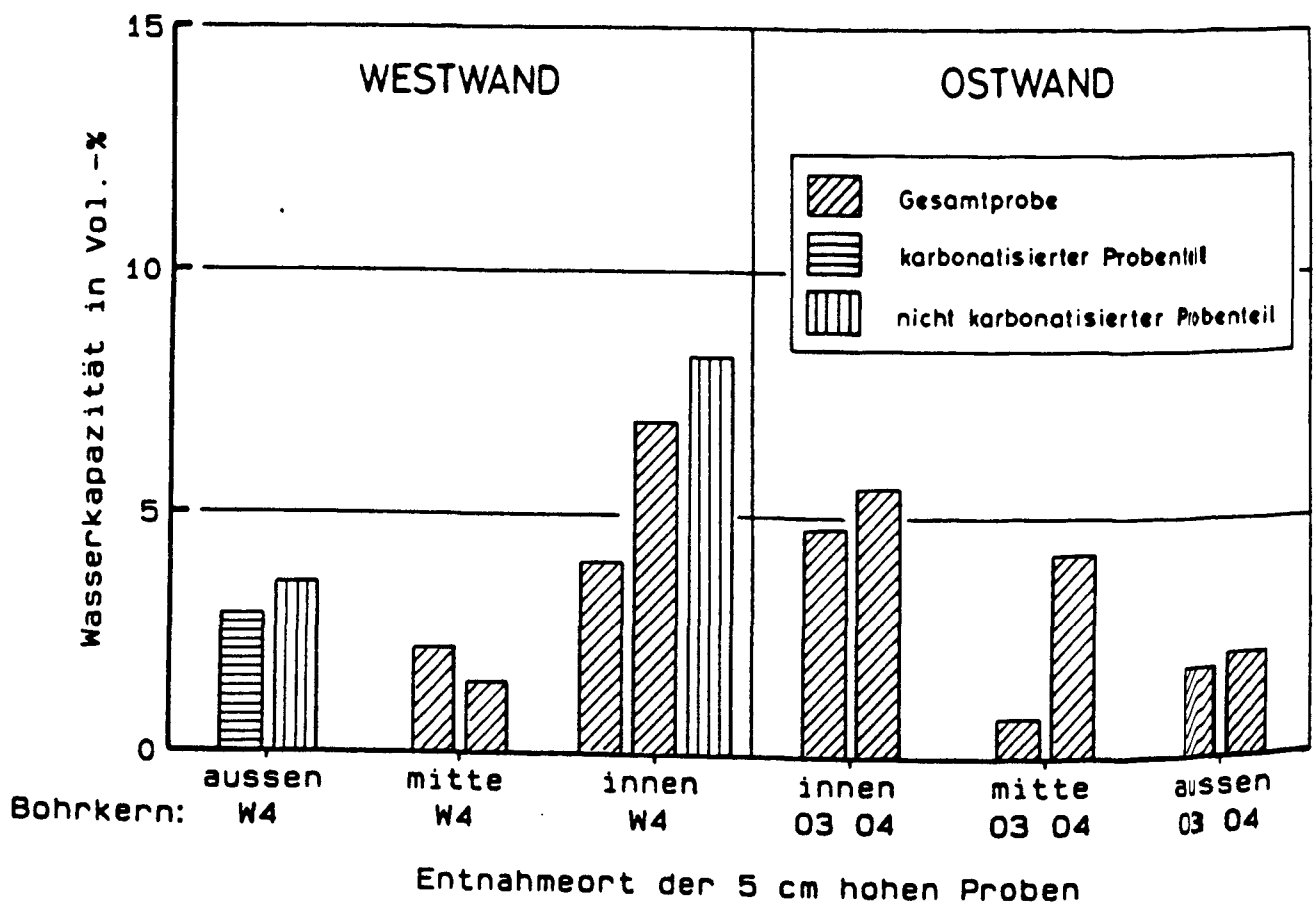
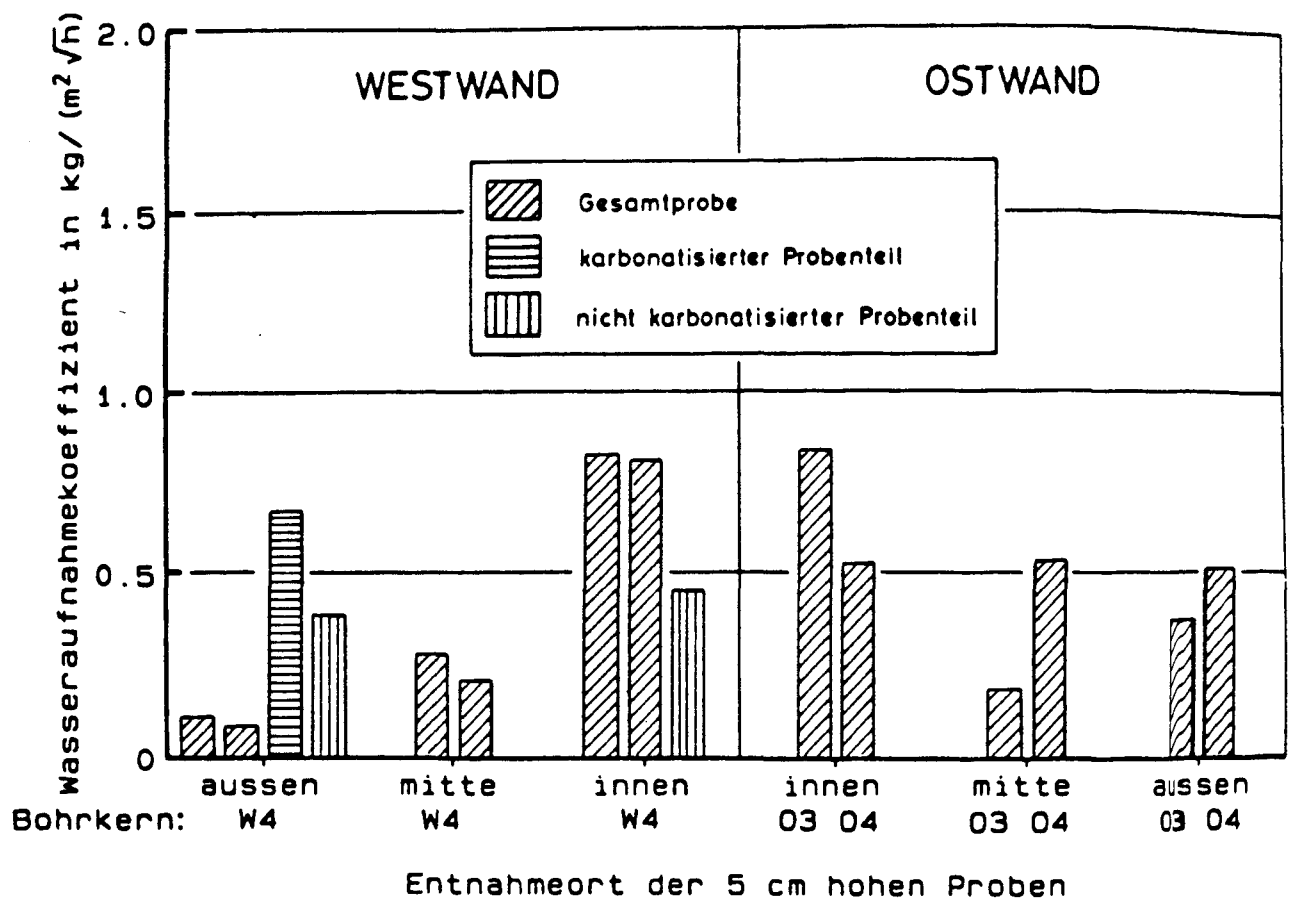


Bild D106

Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserkapazität der verschiedenen Tiefenbereichen der West- und Ostwand entnommenen Proben des Versuchshauses 4 (nähere Erläuterungen zur Legende siehe Abschnitt D 3.2.2), HOZ 375.

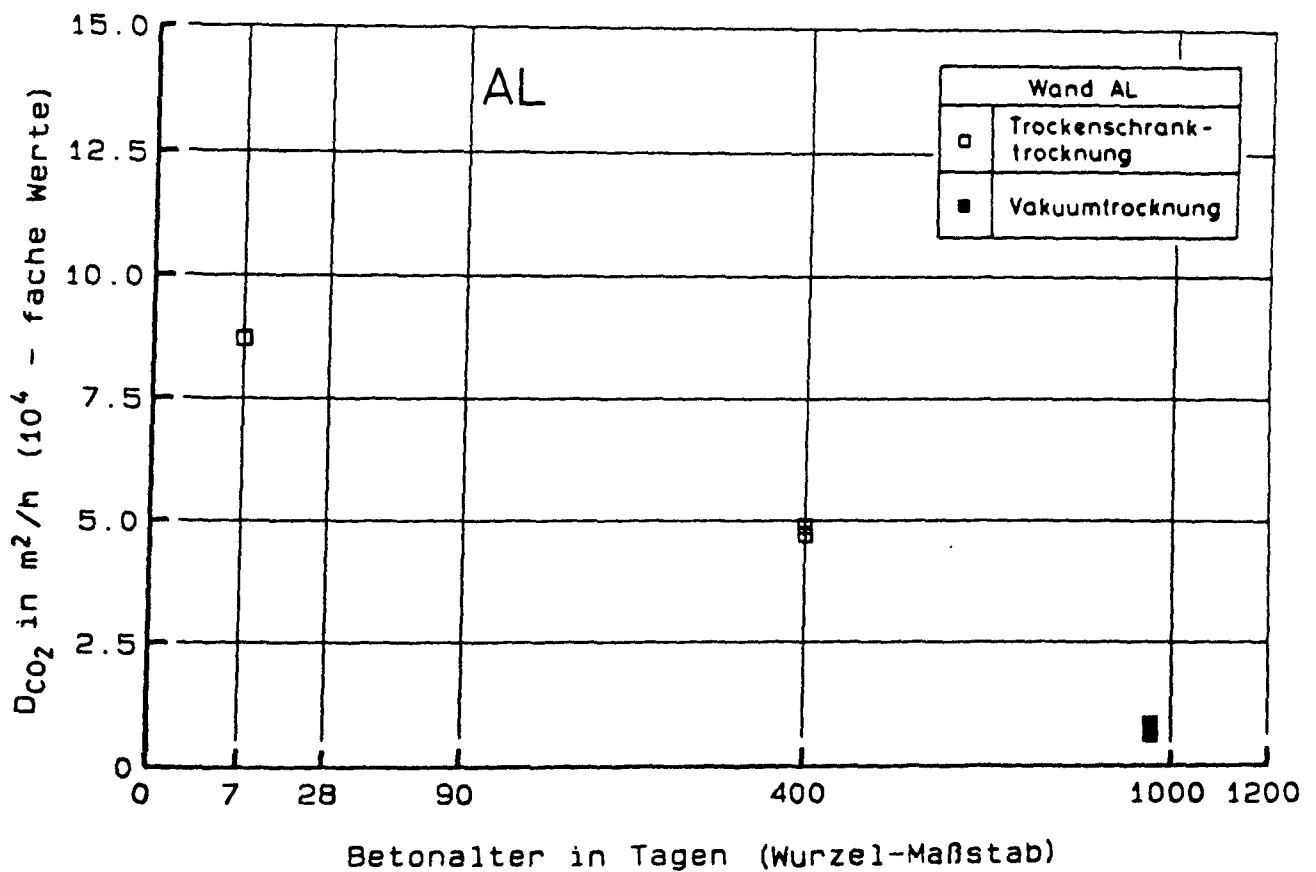
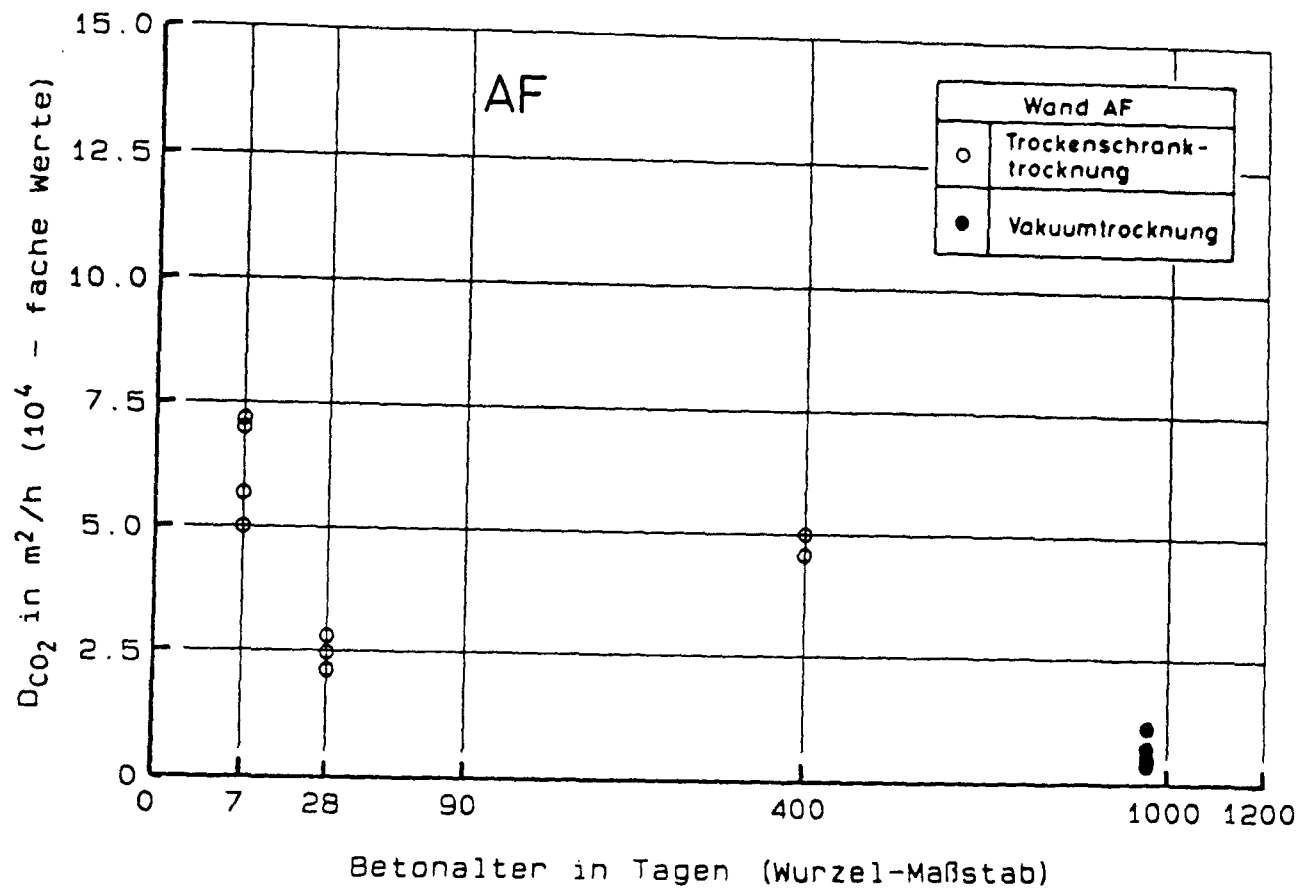


Bild D107

Zeitliche Entwicklung des CO_2 - Diffusionskoeffizienten für Wandpaar A (Wand AF oben, Wand AL unten) der Proben der Wandmitte in Abhängigkeit der versuchsvorbereitenden Trocknungsart.

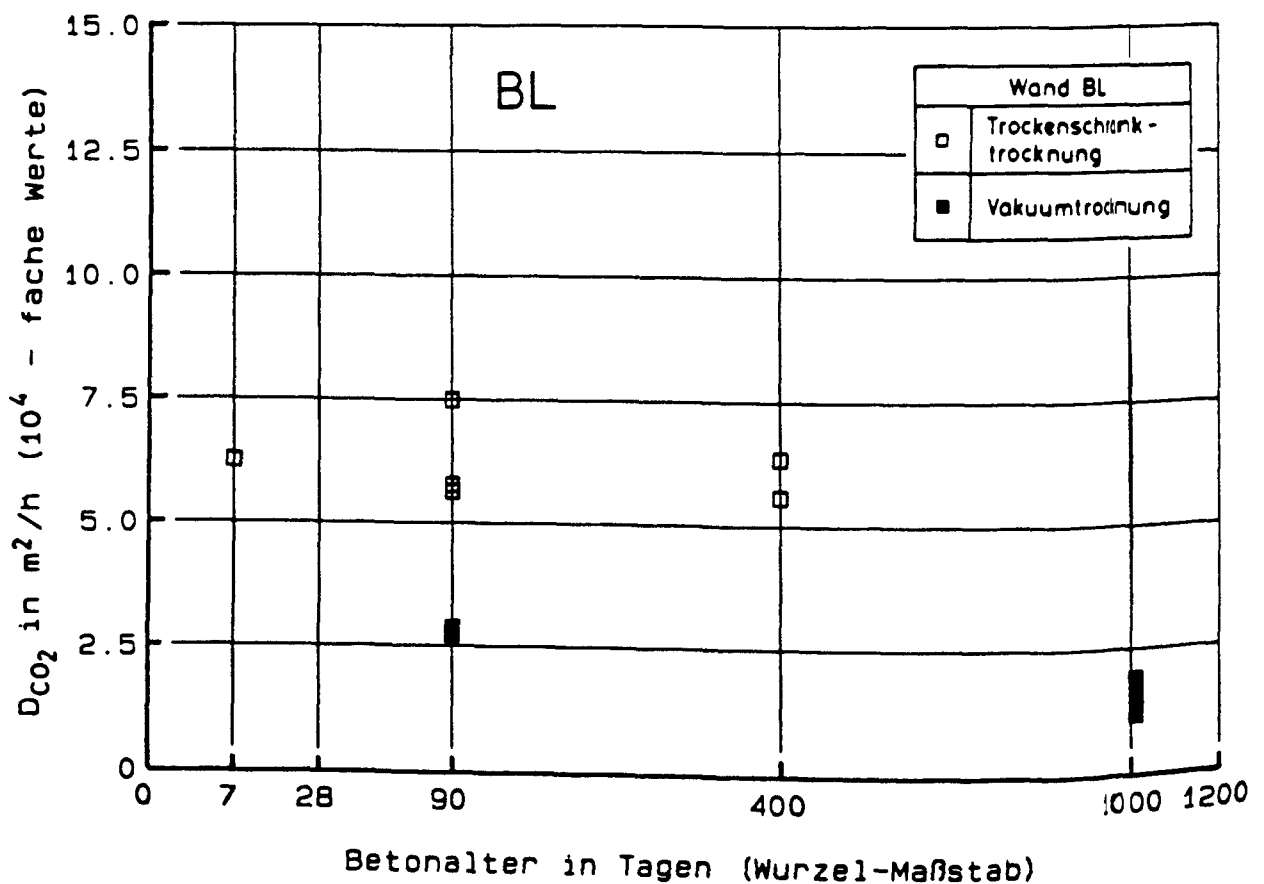
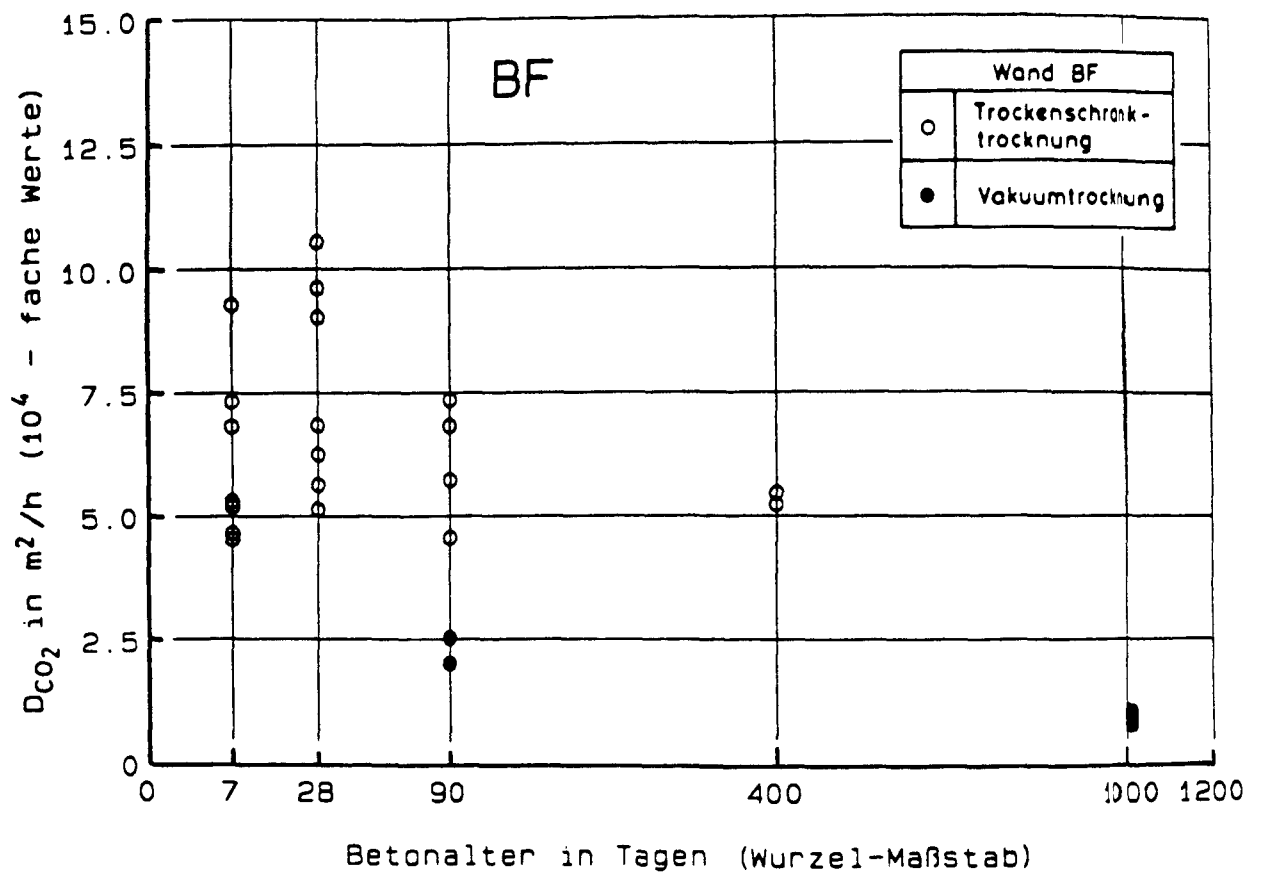


Bild D108

Zeitliche Entwicklung des CO_2 - Diffusionskoeffizienten für Wandpaar B (Wand BF oben, Wand BL unten) der Proben der Wandmitte in Abhängigkeit der versuchsvorbereitenden Trocknungsart.

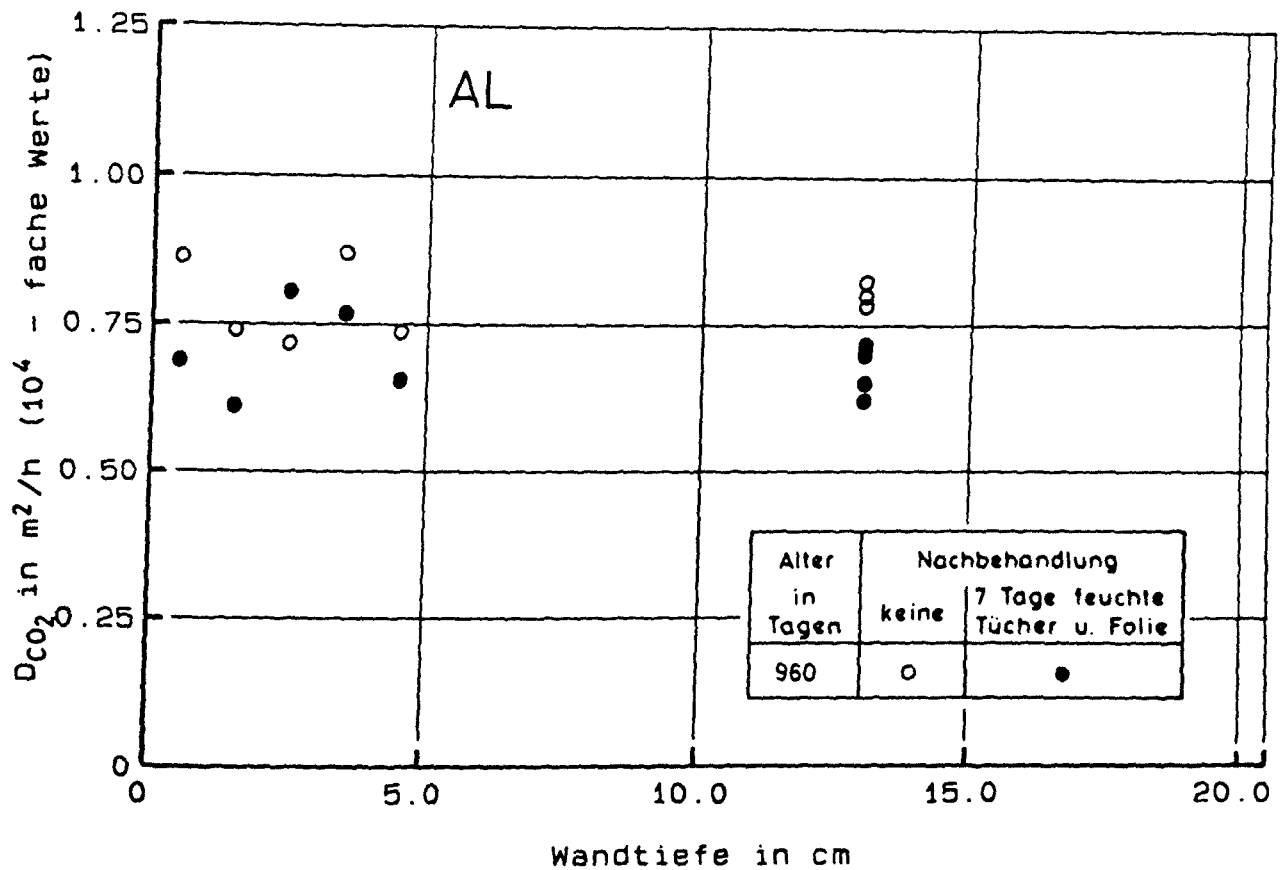
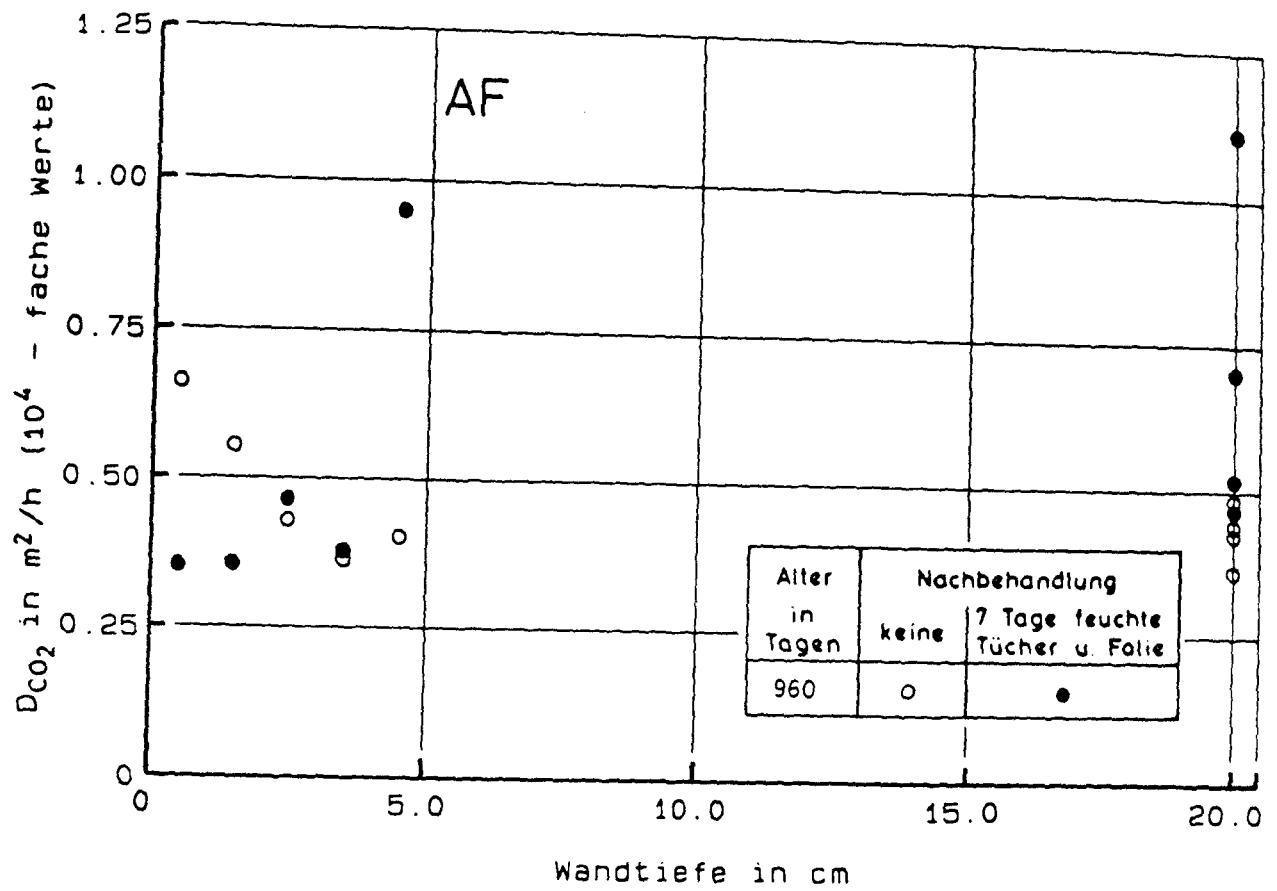


Bild D109

Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe für die 960 Tage alten Proben von Wandpaar A (Wand AF oben, Wand AL unten).

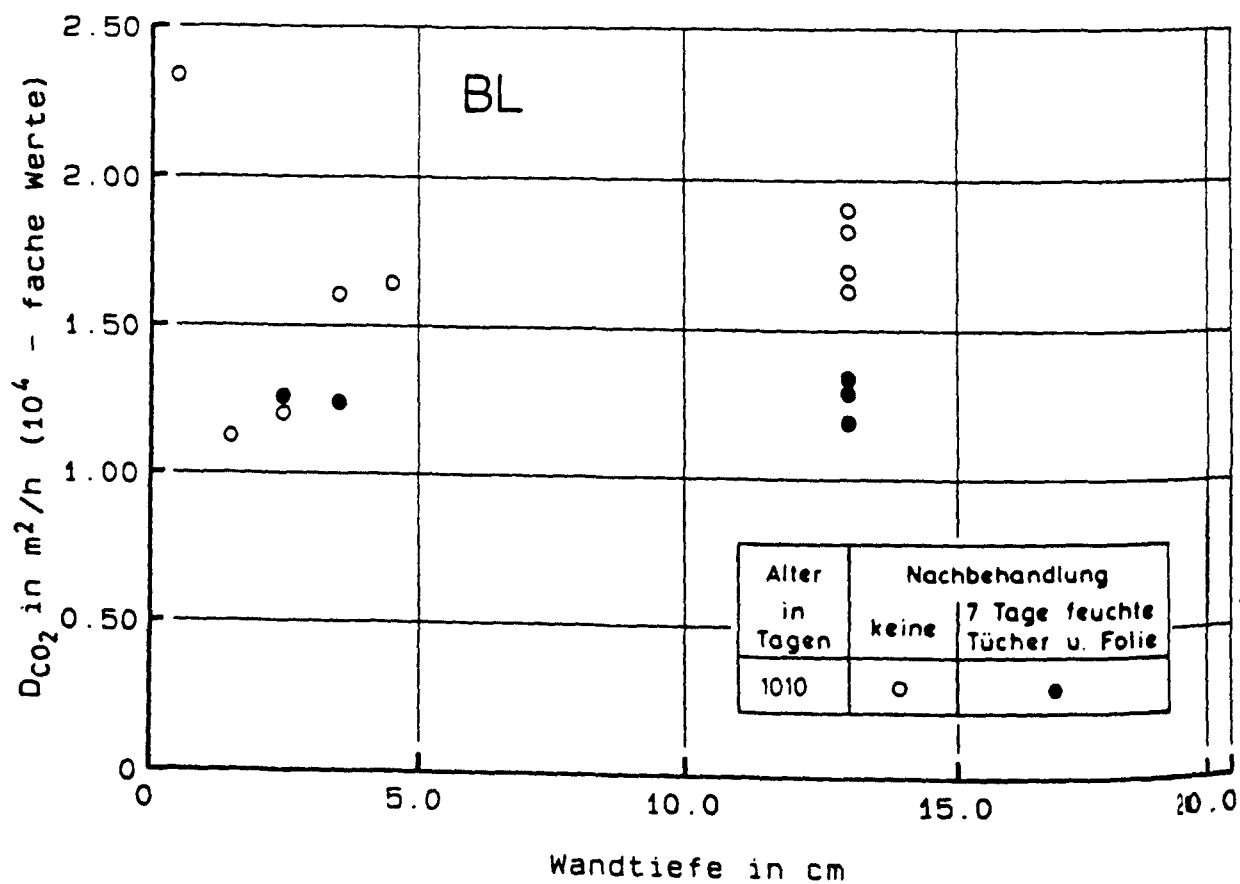
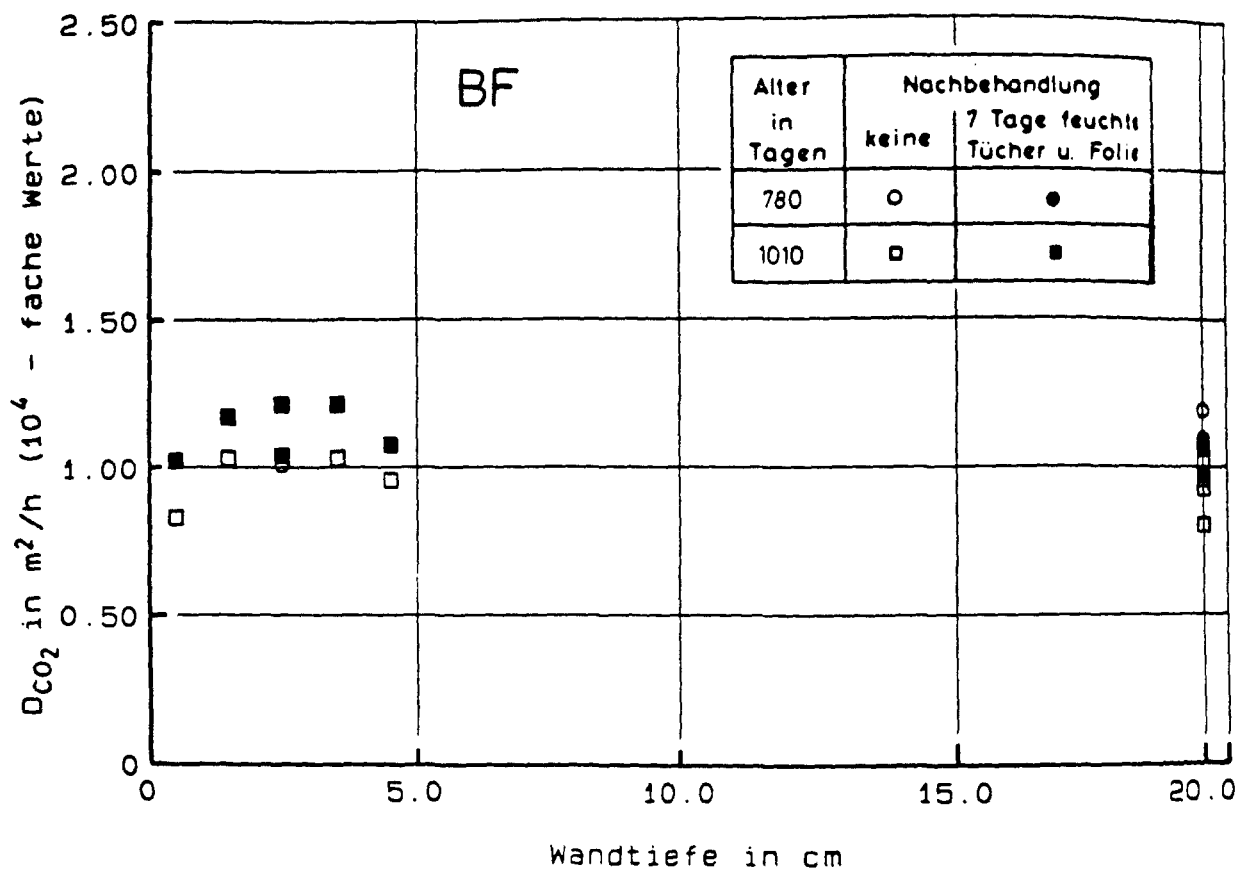


Bild D110

Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe für die 780 und 1010 Tage alten Proben von Wandpaar 8 (Wand BF oben, Wand BL unten).

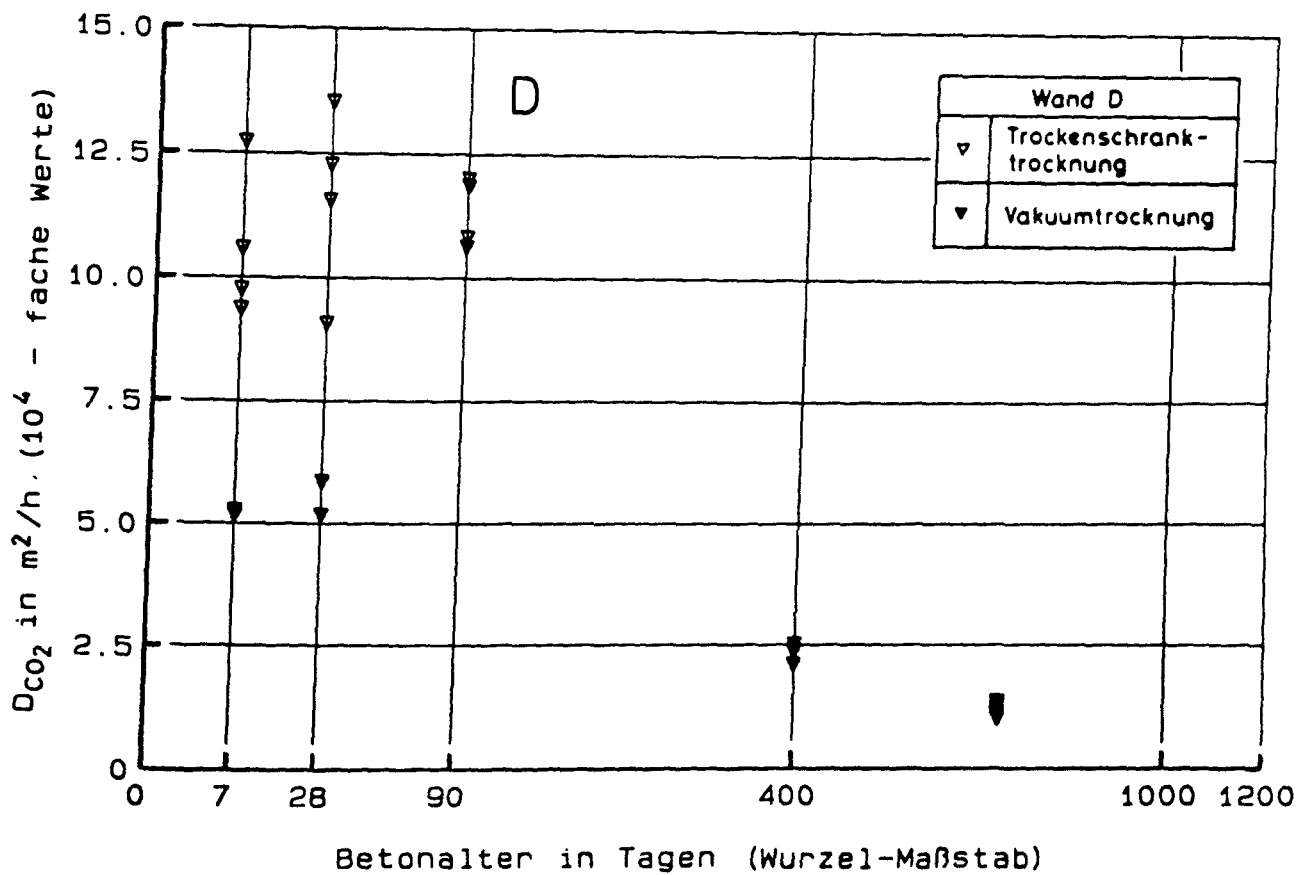
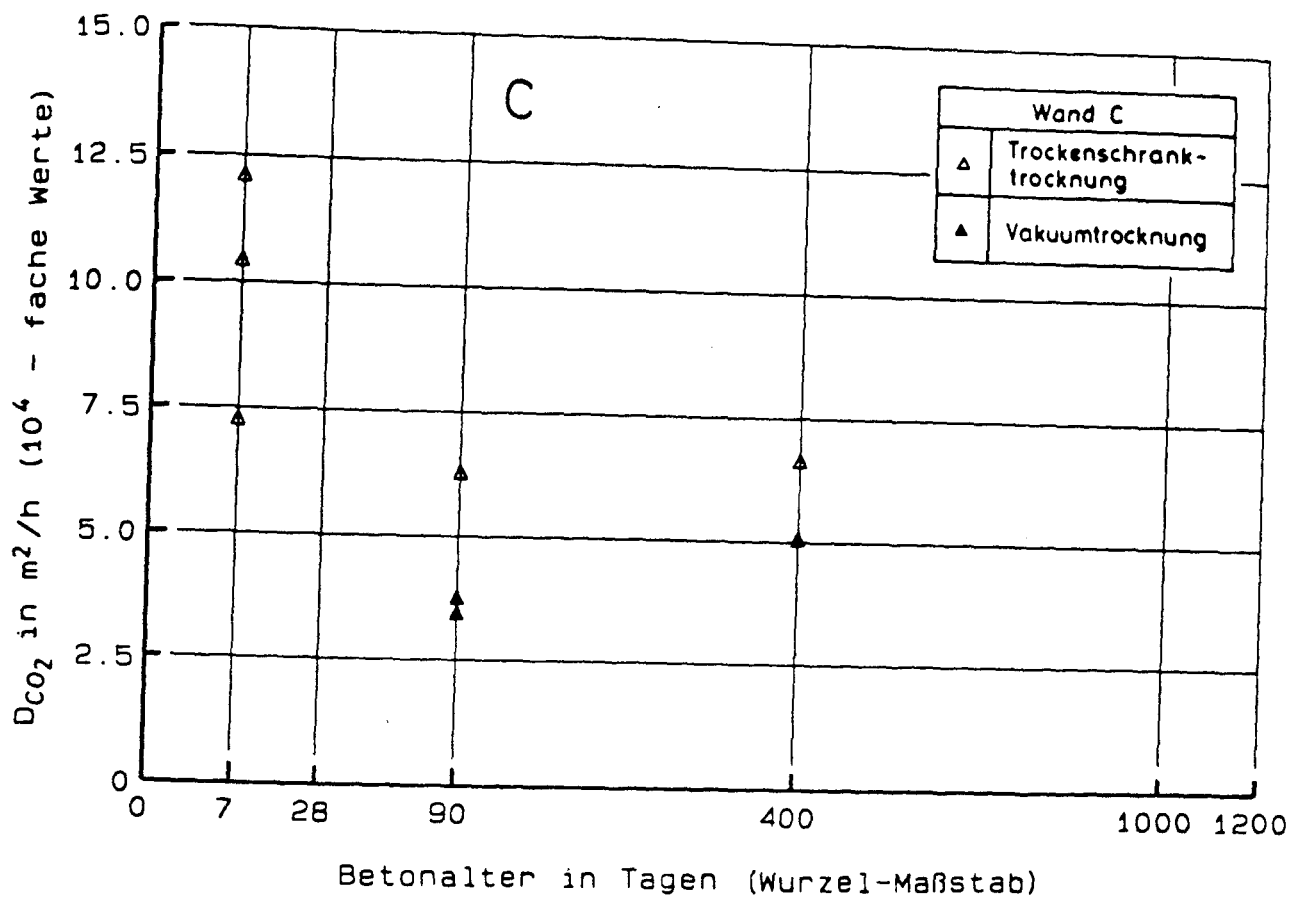


Bild D111

Zeitliche Entwicklung des CO_2 - Diffusionskoeffizienten für Wand C (oben) und Wand D (unten) der Proben der Wandmitte in Abhängigkeit der versuchsvorbereitenden Trocknungsart.

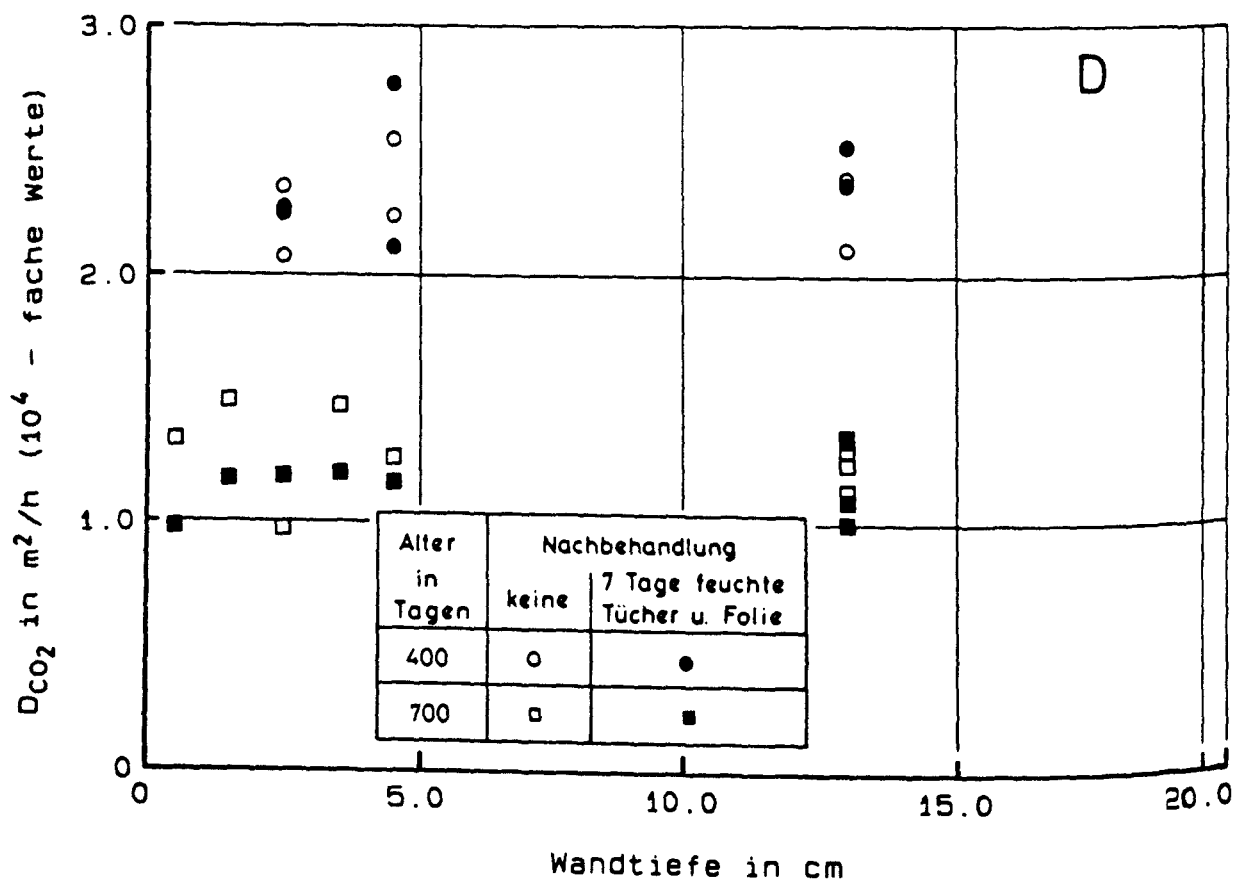
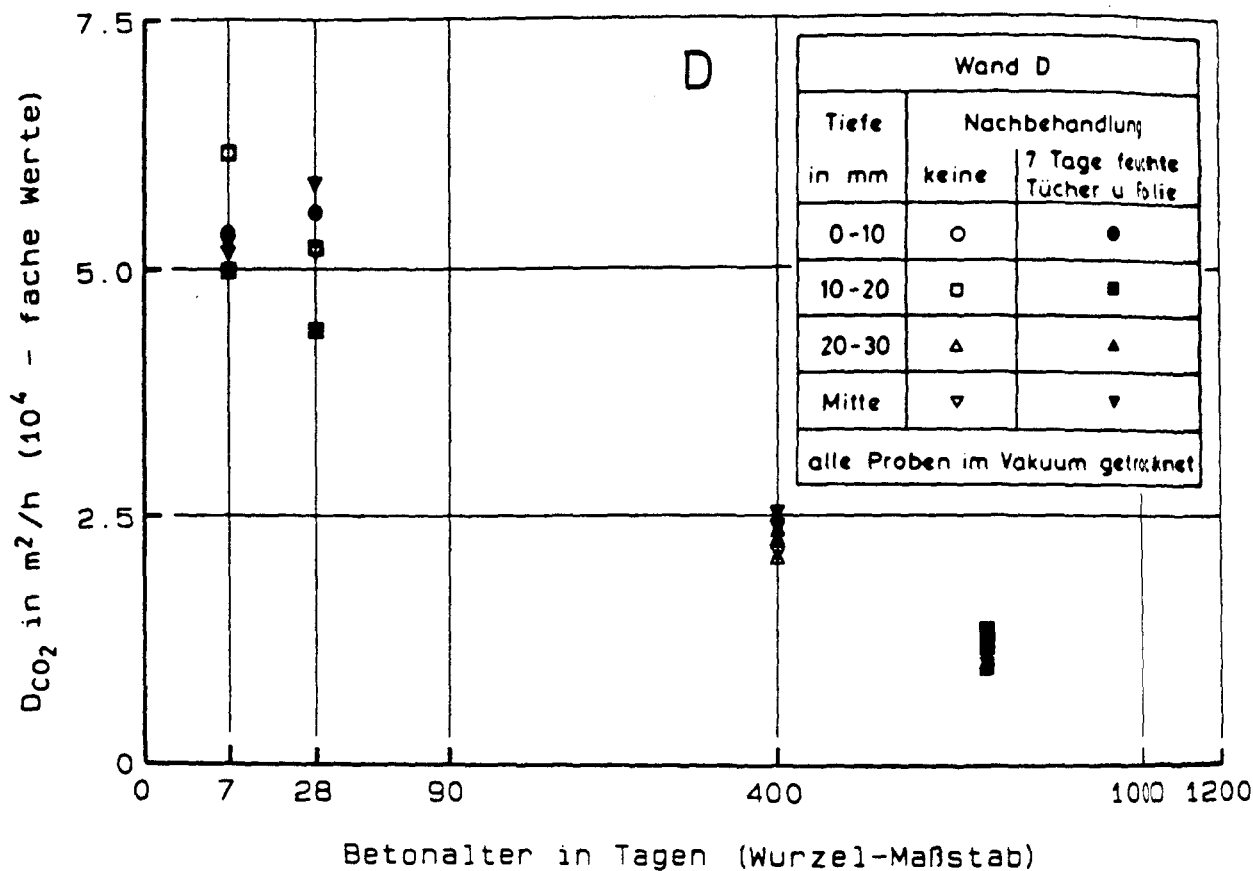


Bild D112

Zeitliche Entwicklung des CO_2 - Diffusionskoeffizienten für Wand D (im Vakuum getrocknete Proben verschiedener Wandtiefen und Nachbehandlungsarten) (obere Bildhälfte) sowie die Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe für die 400 und 700 Tage alten Proben der Wand D (untere Bildhälfte).

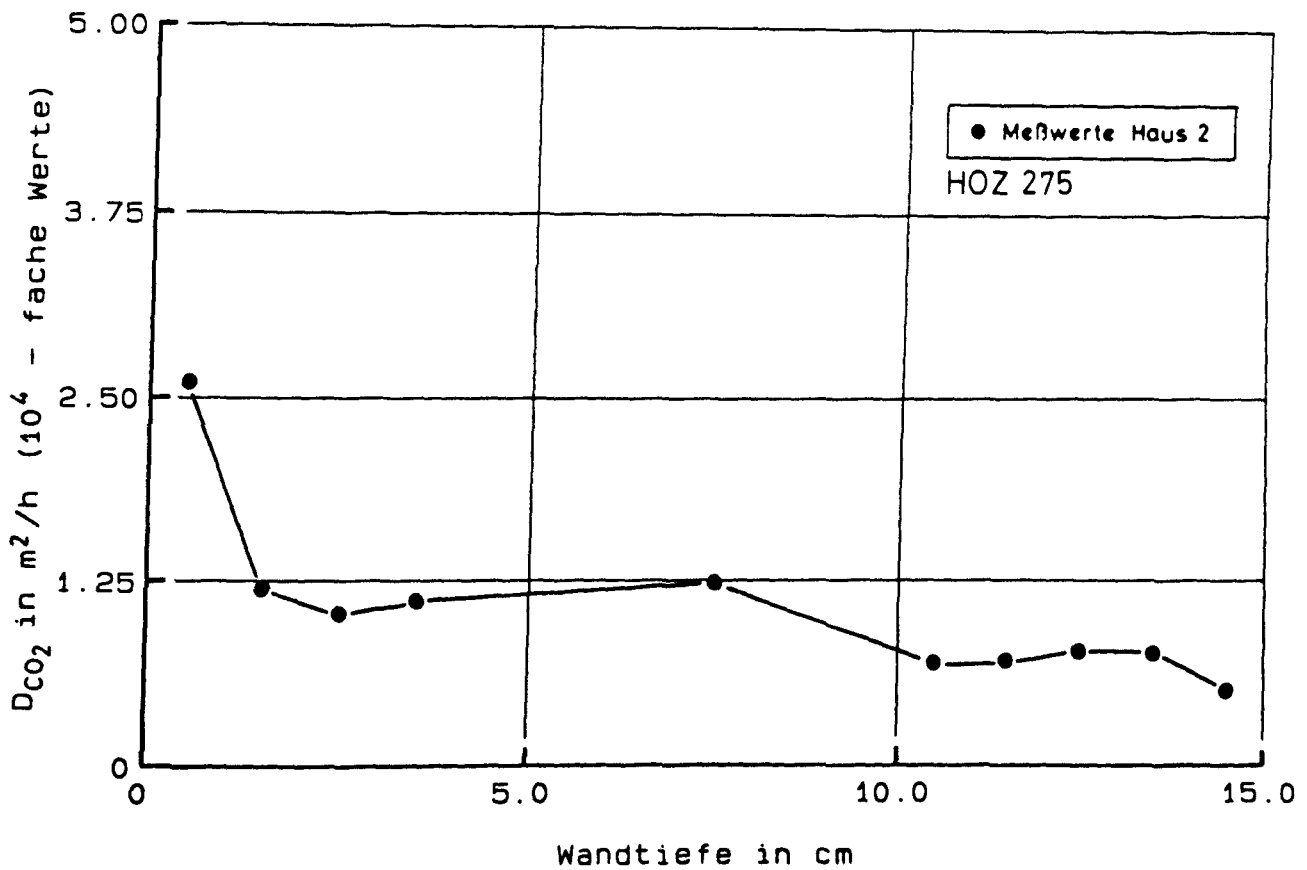
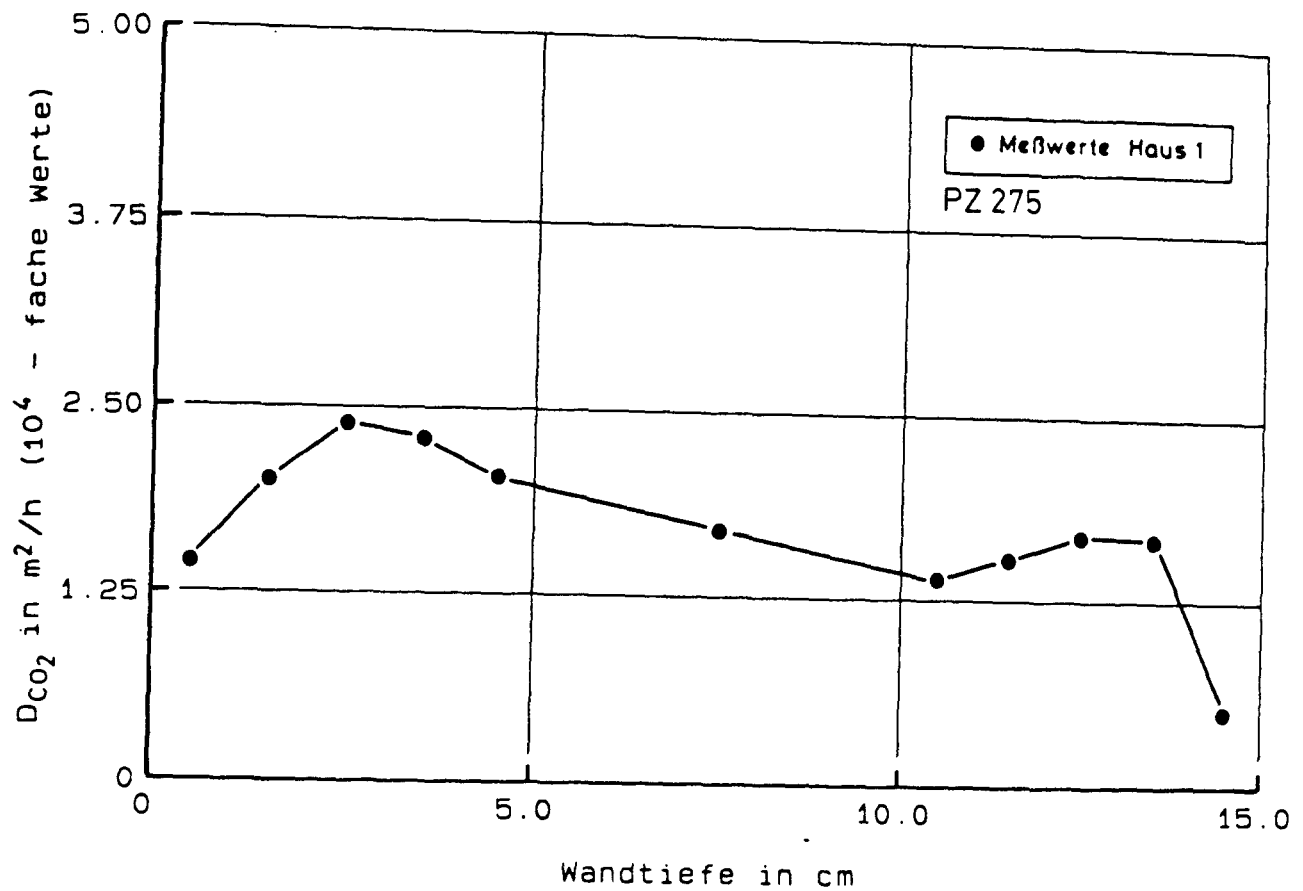


Bild D113

Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe (innen: $d = 0$ cm; außen: $d = 15$ cm) für Haus 1 (oben) und Haus 2 (unten) aus Beckum.

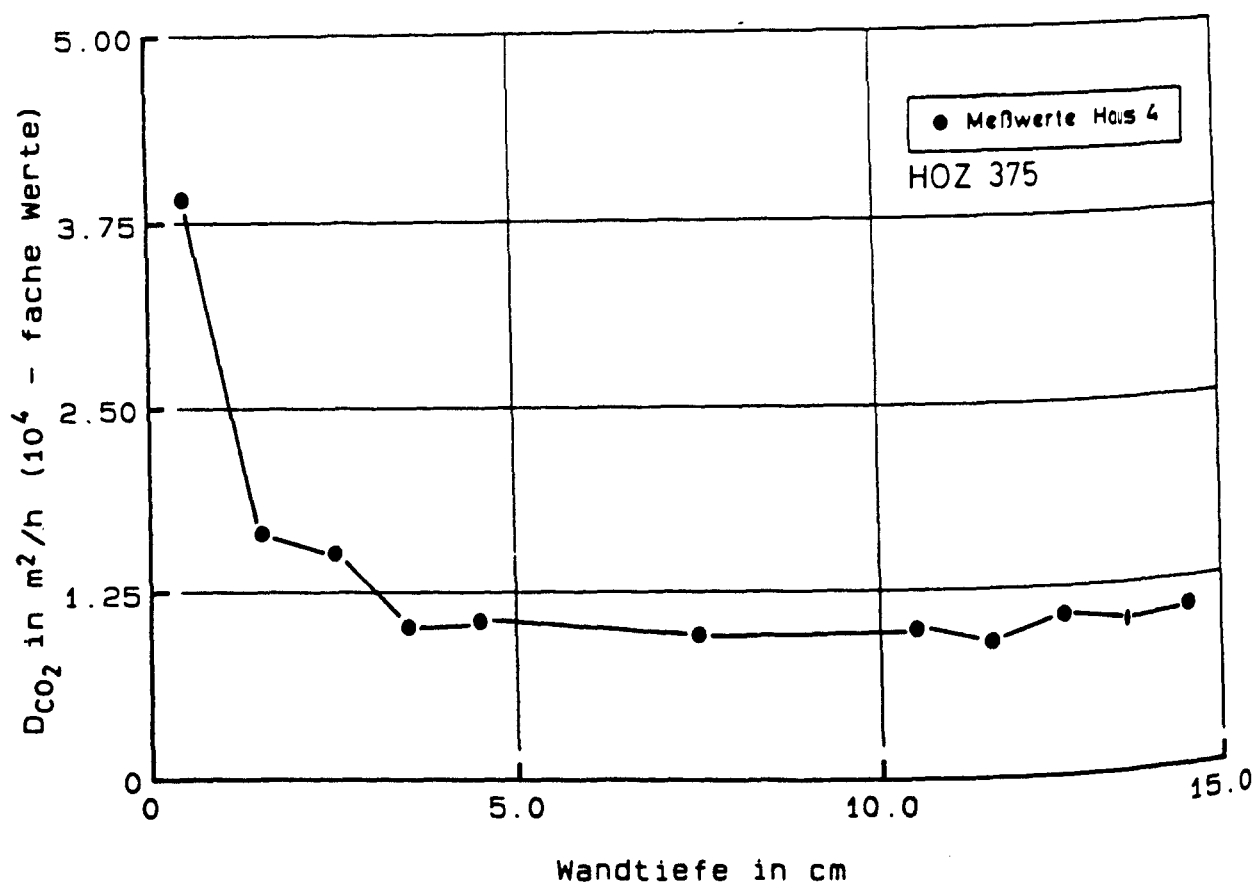
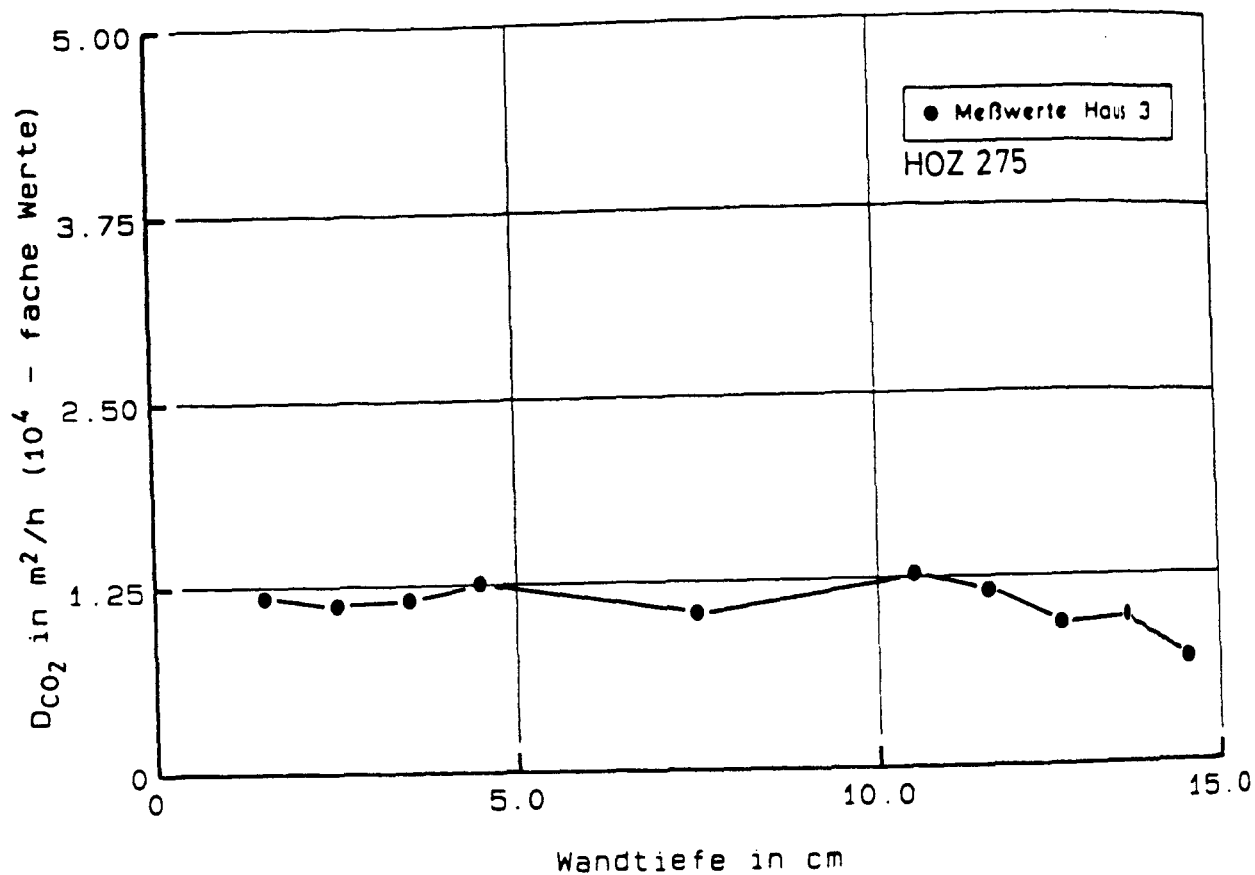


Bild D114

Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe (innen: $d = 0$ cm; außen: $d = 15$ cm) für Haus 3 (oben) und Haus 4 (unten) aus Beckum.

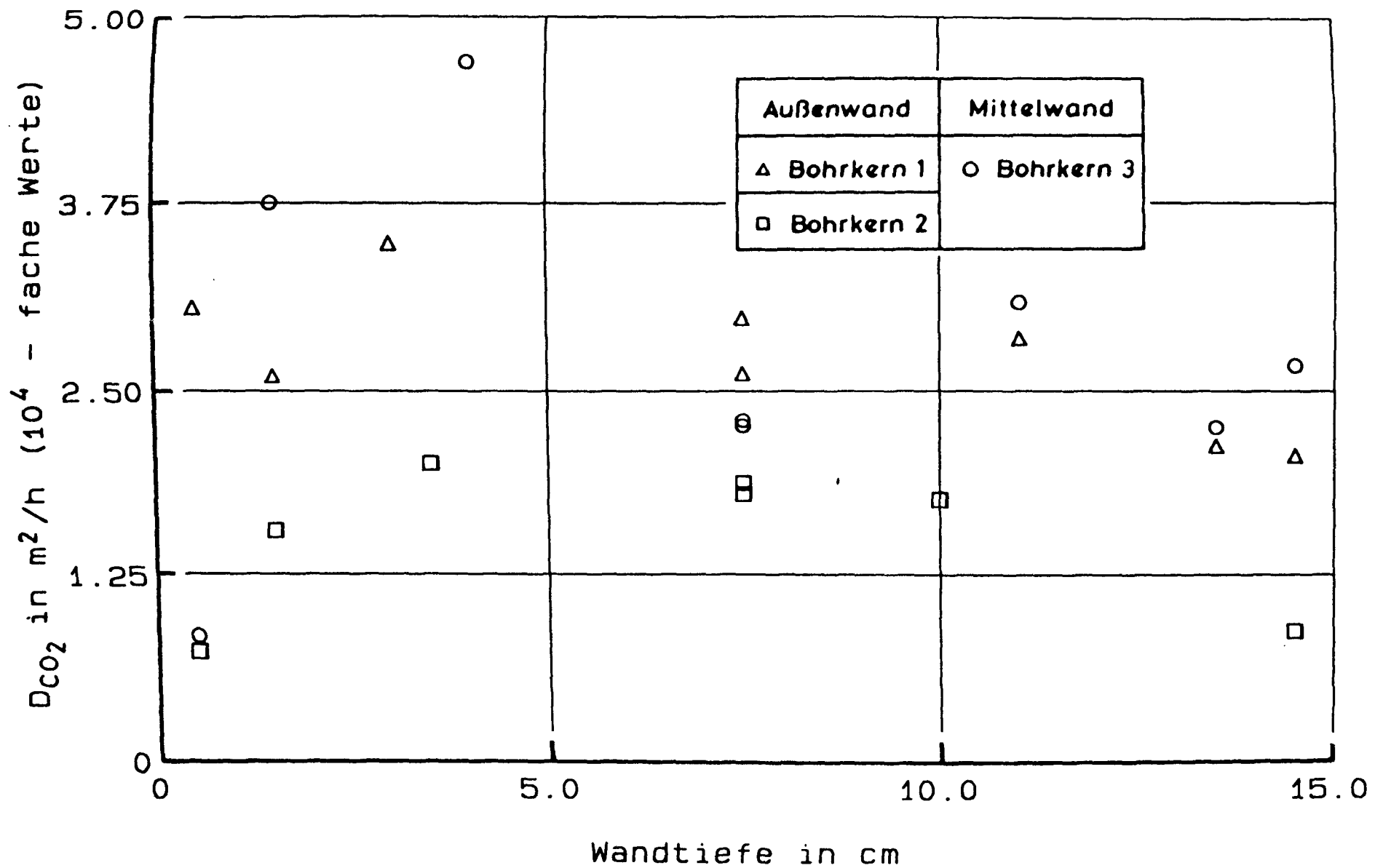
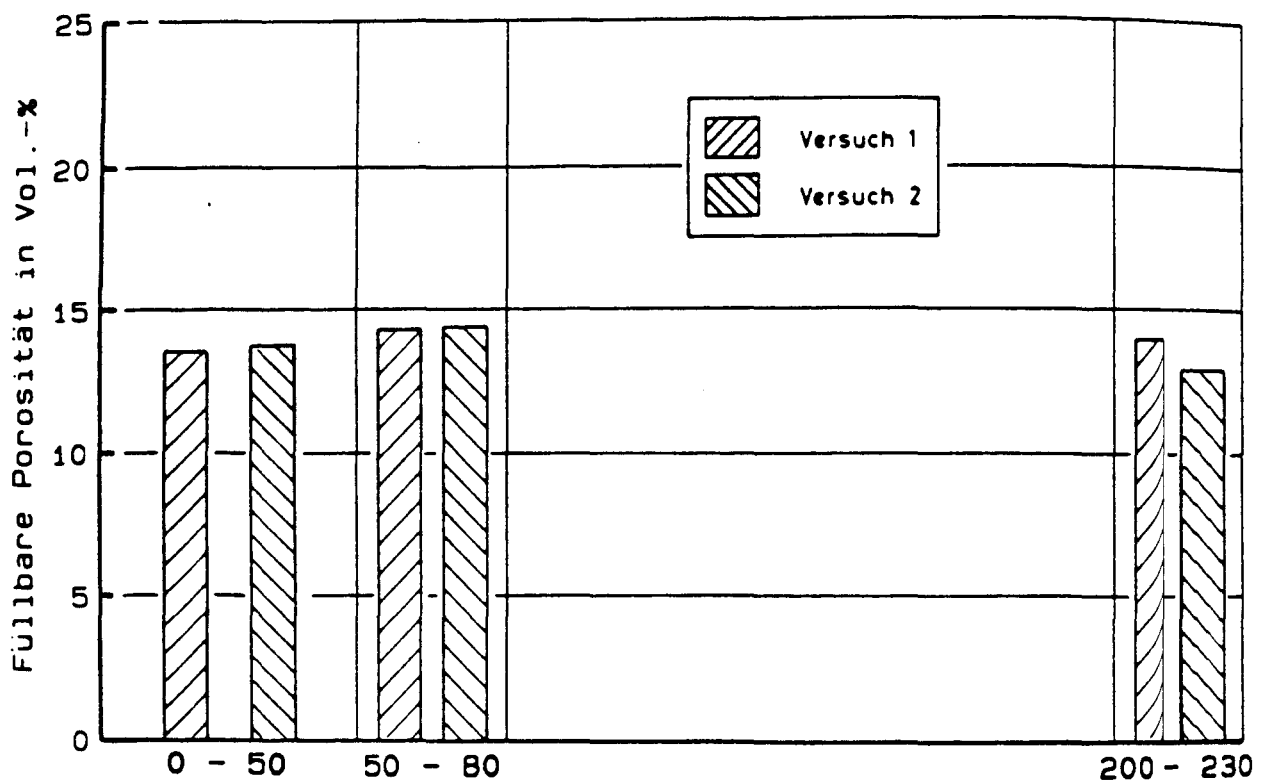
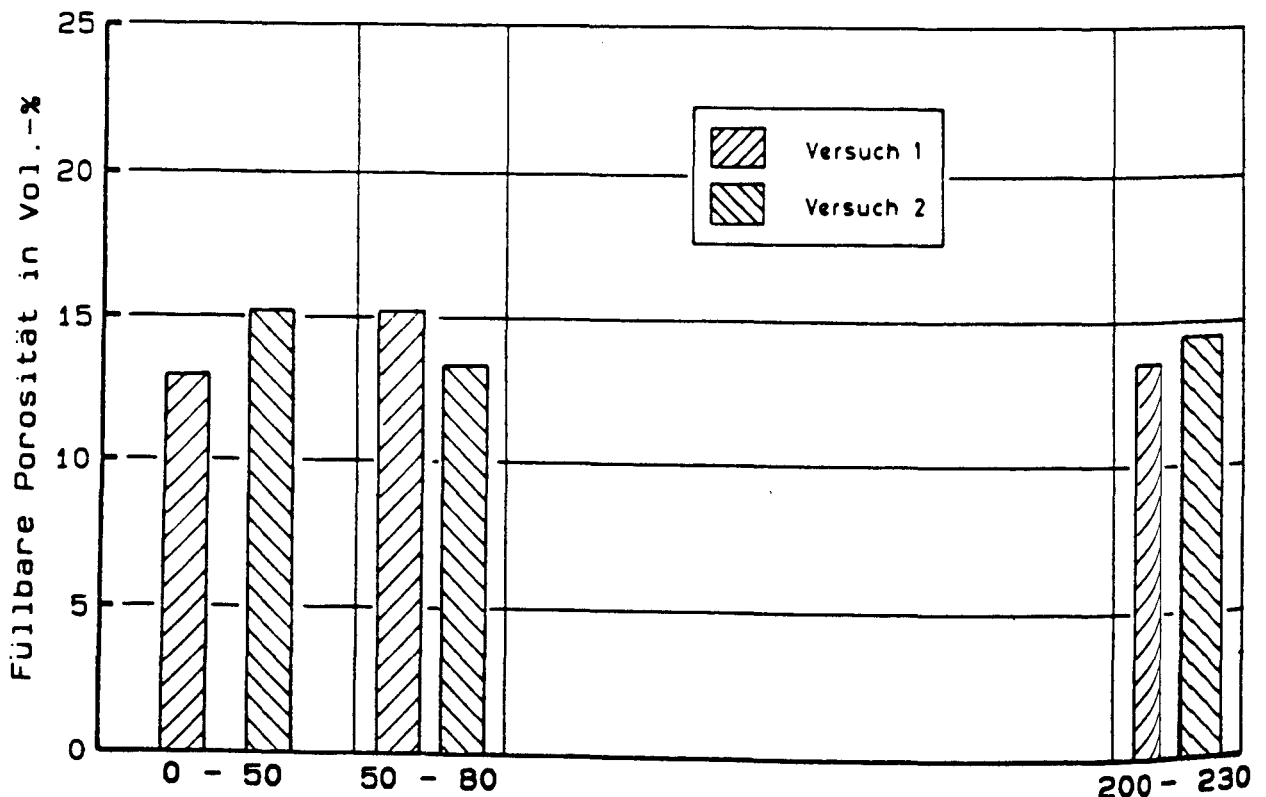


Bild D115

Abhängigkeit des CO_2 - Diffusionskoeffizienten von der Wandtiefe (außen: $d = 0$ cm; innen: $d = 15$ cm) für die Kühlhauswand.



Entnahmeort der Proben in mm
(Entfernung von der nach Süden weisenden Oberfläche)



Entnahmeort der Proben in mm
(Entfernung von der nach Süden weisenden Oberfläche)

Bild D116

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand AF.

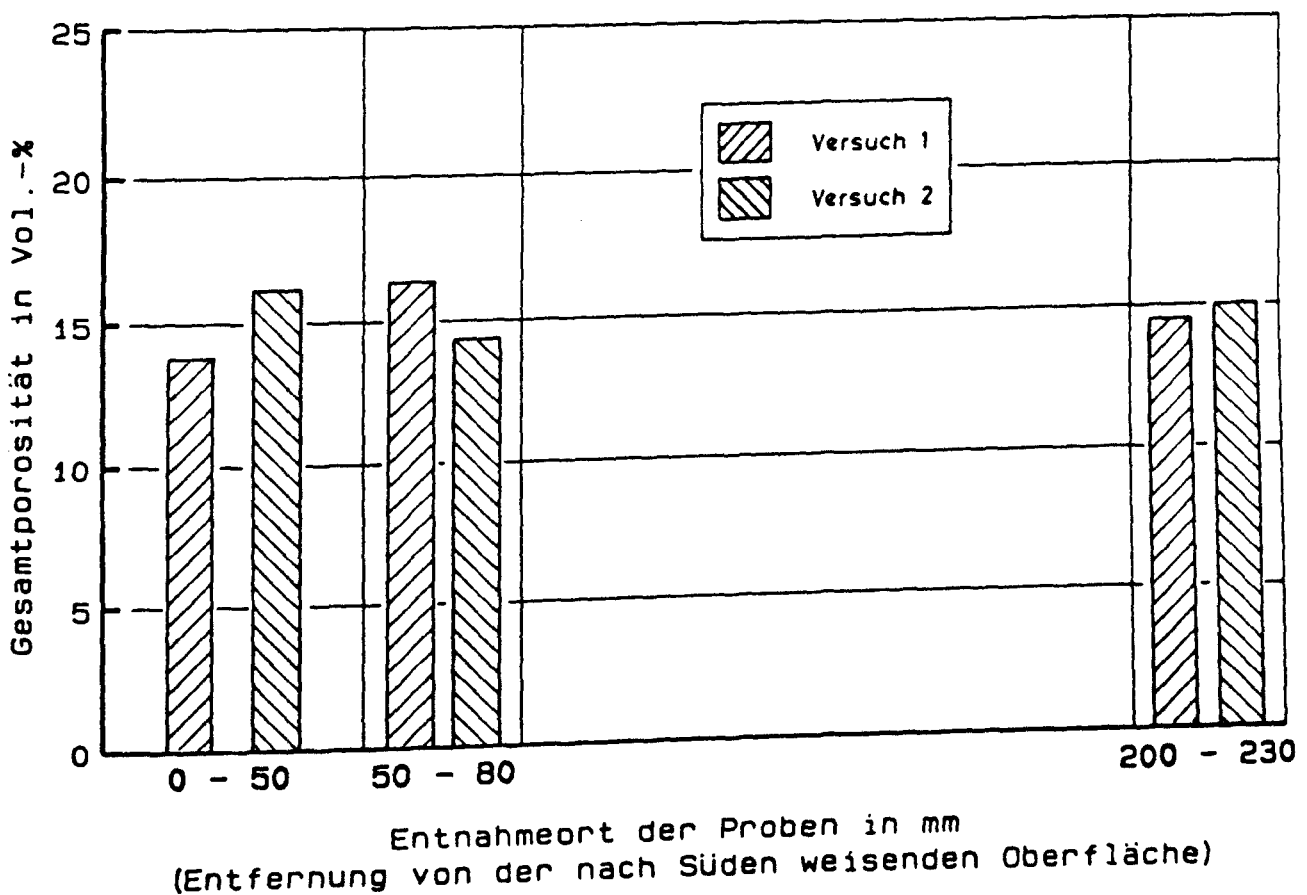
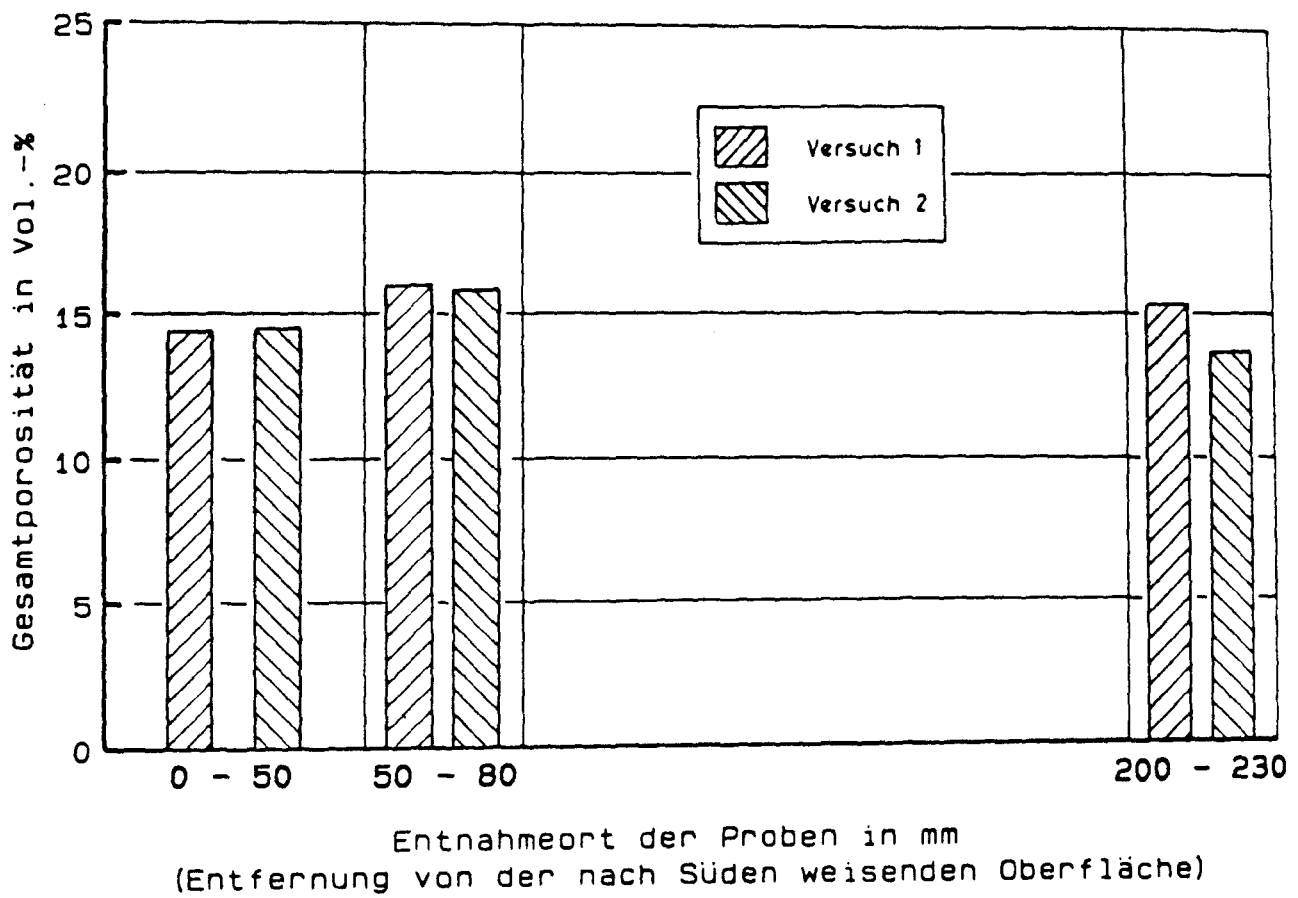


Bild D117

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand AF.

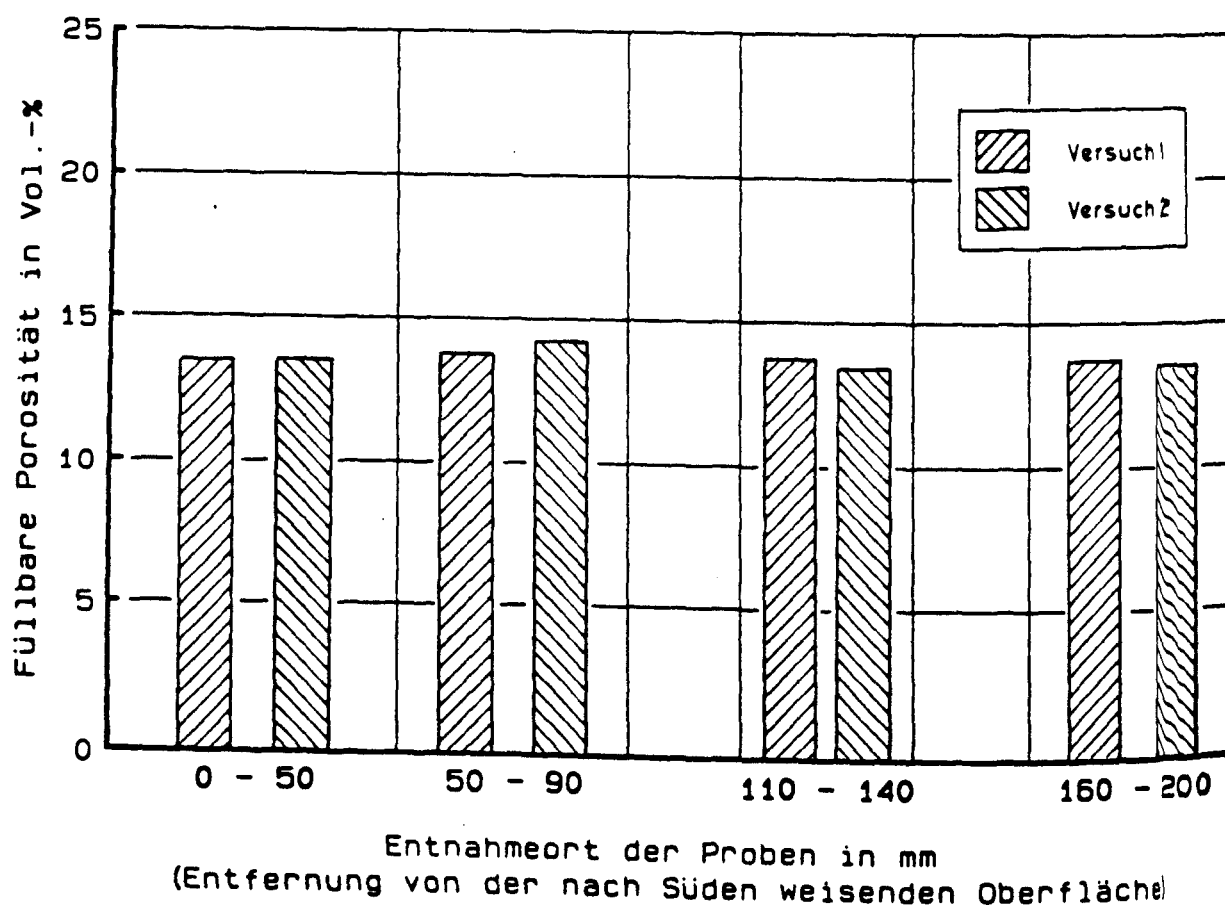
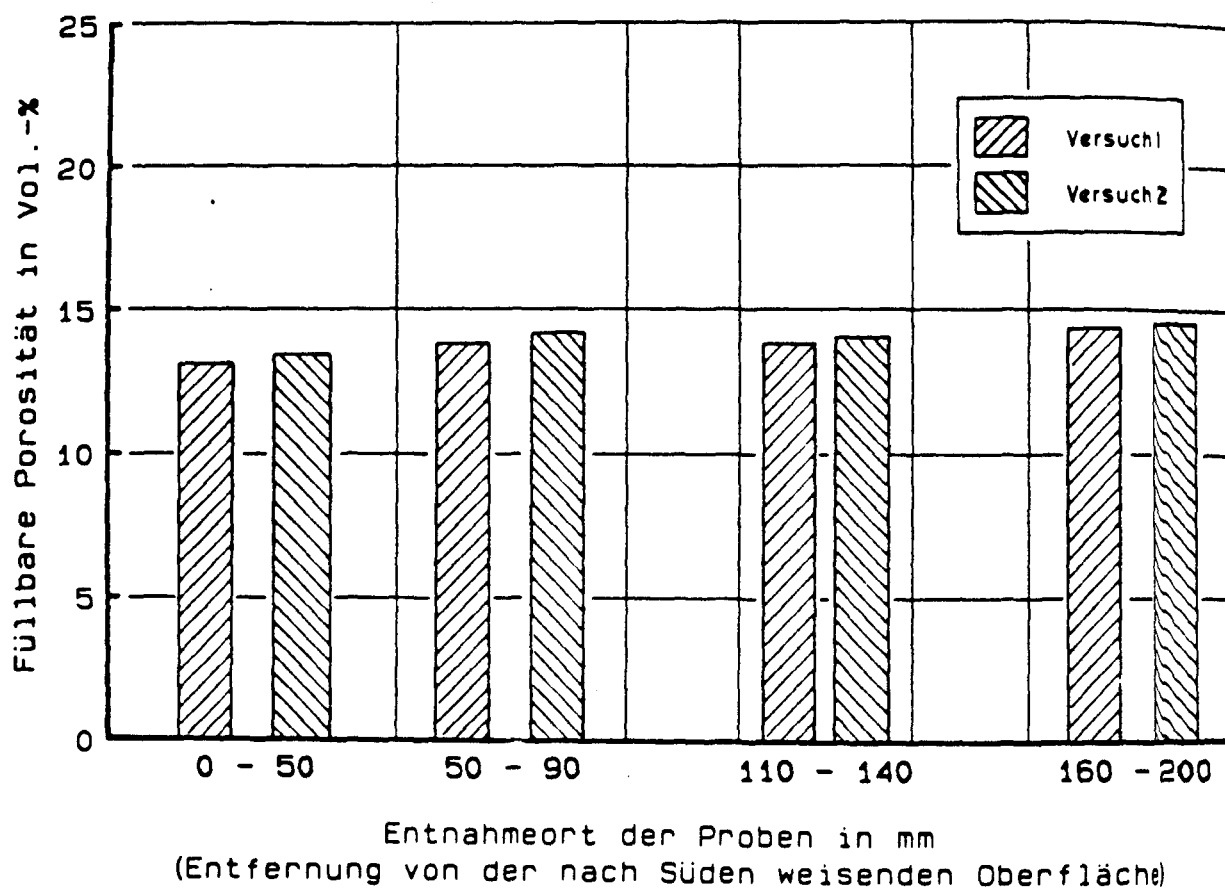


Bild D118

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand AL.

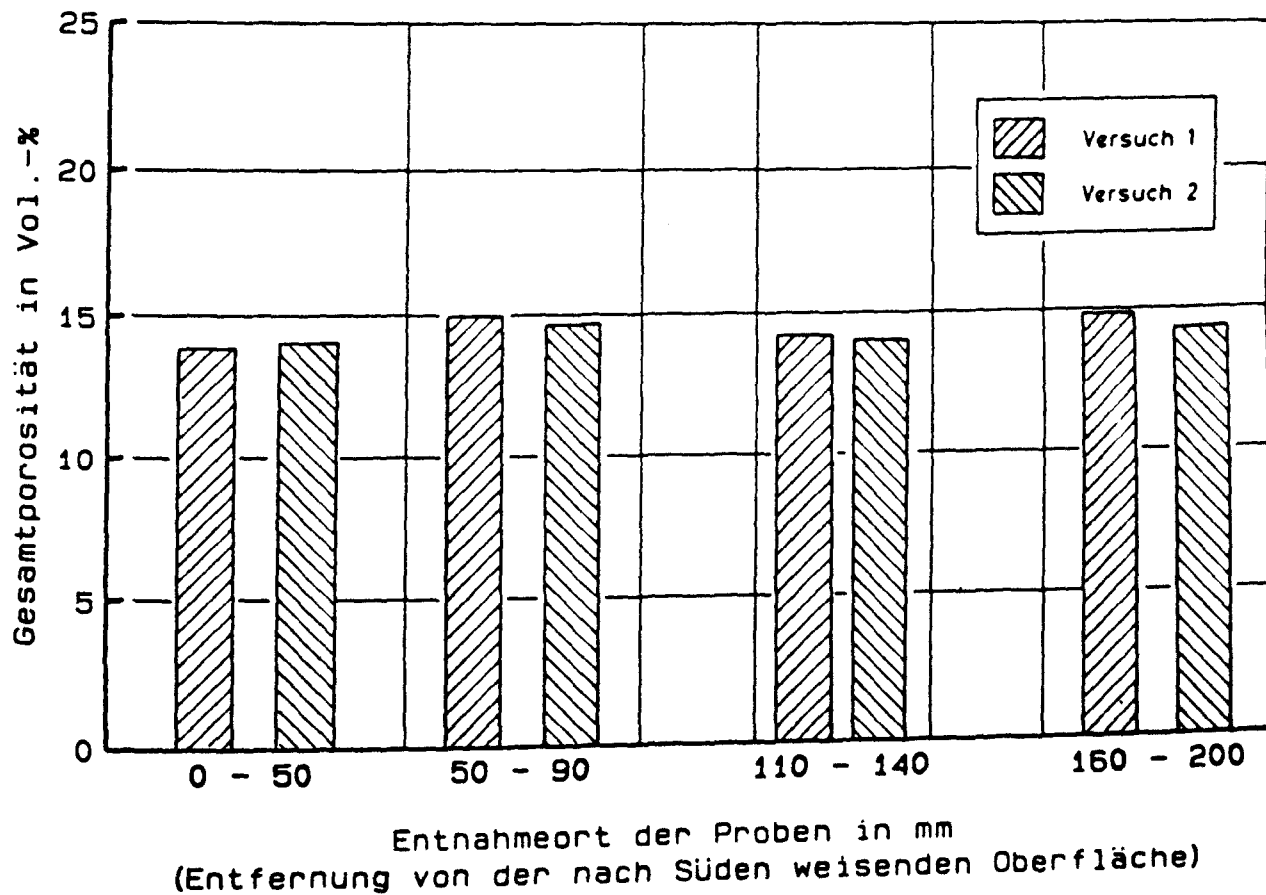
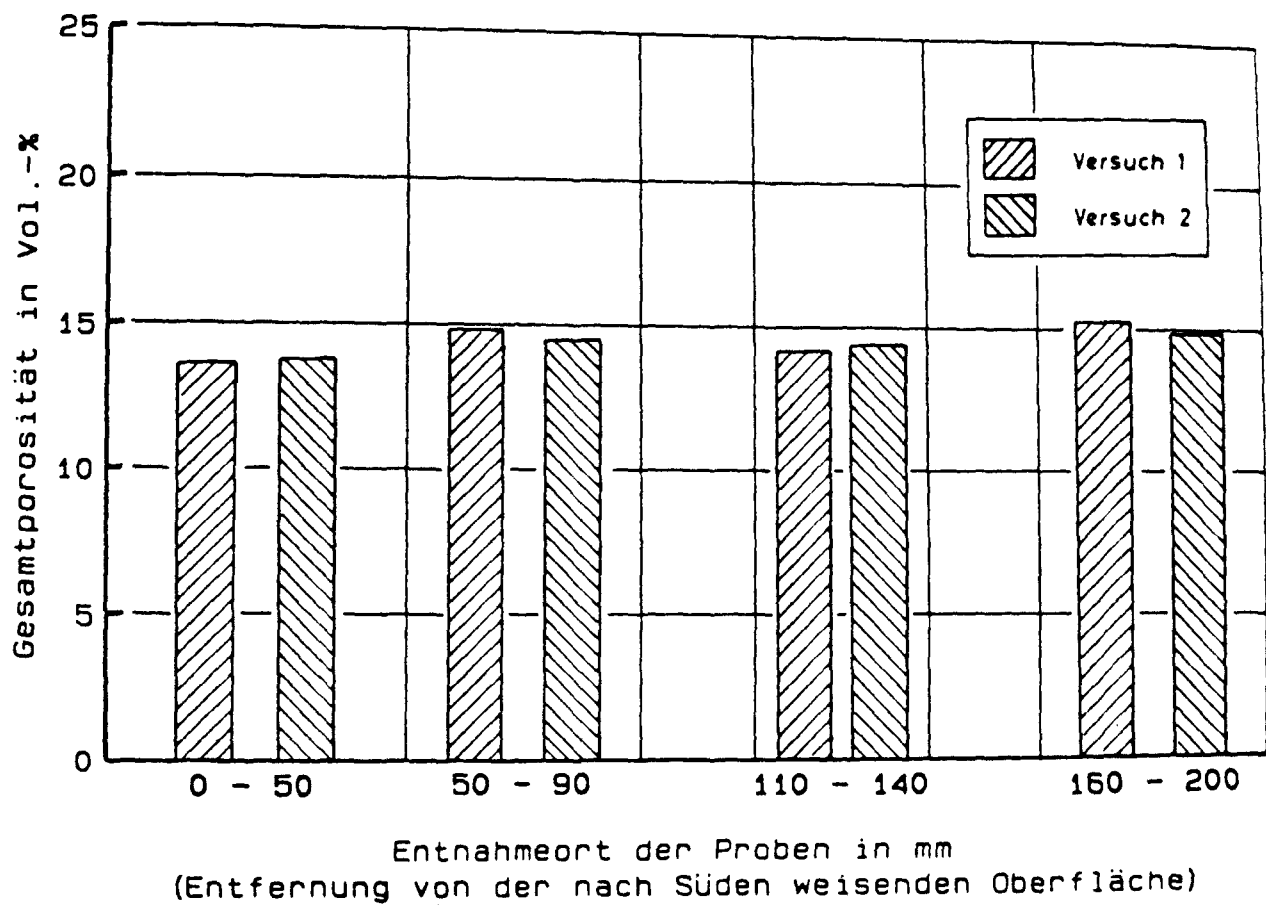


Bild D119

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand AL.

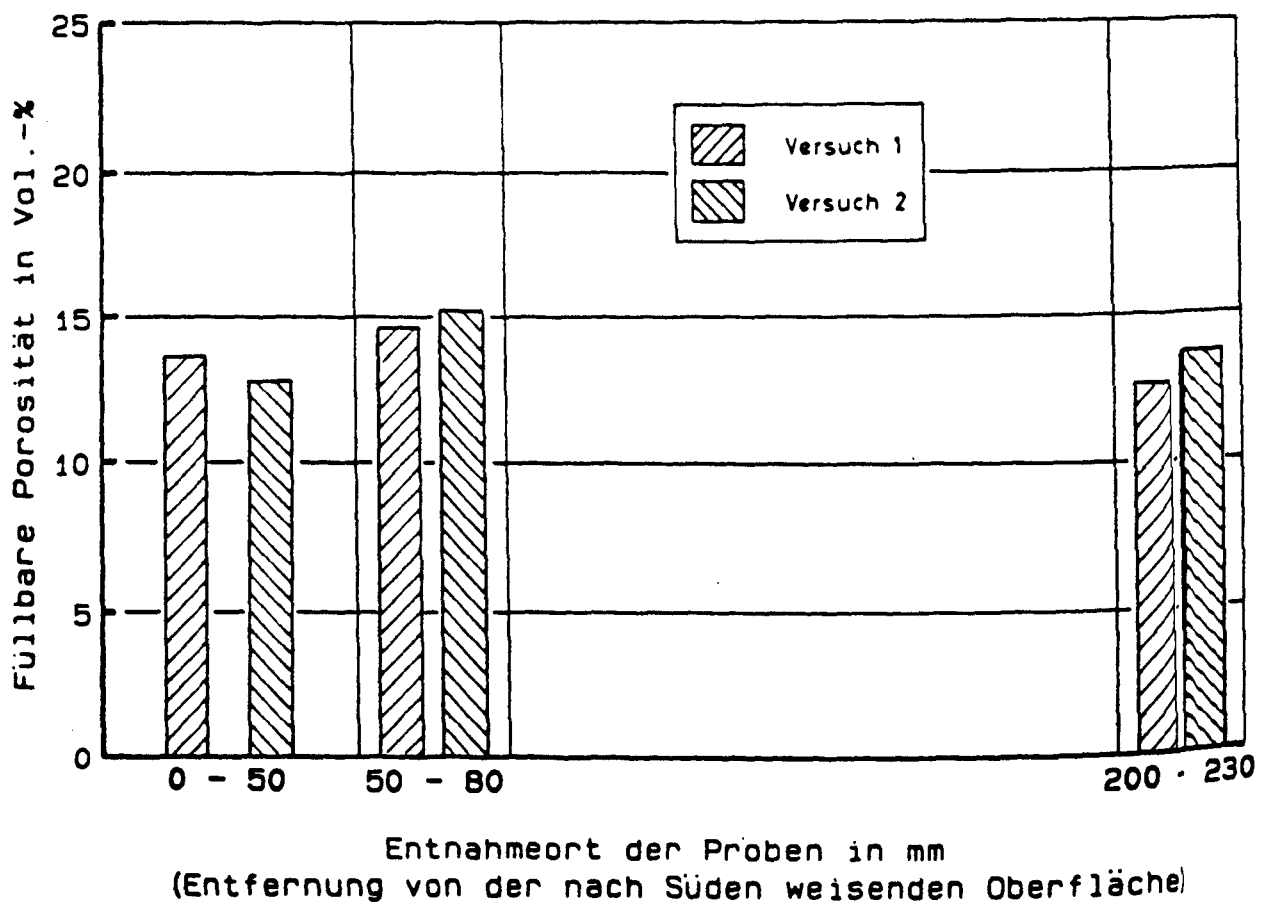
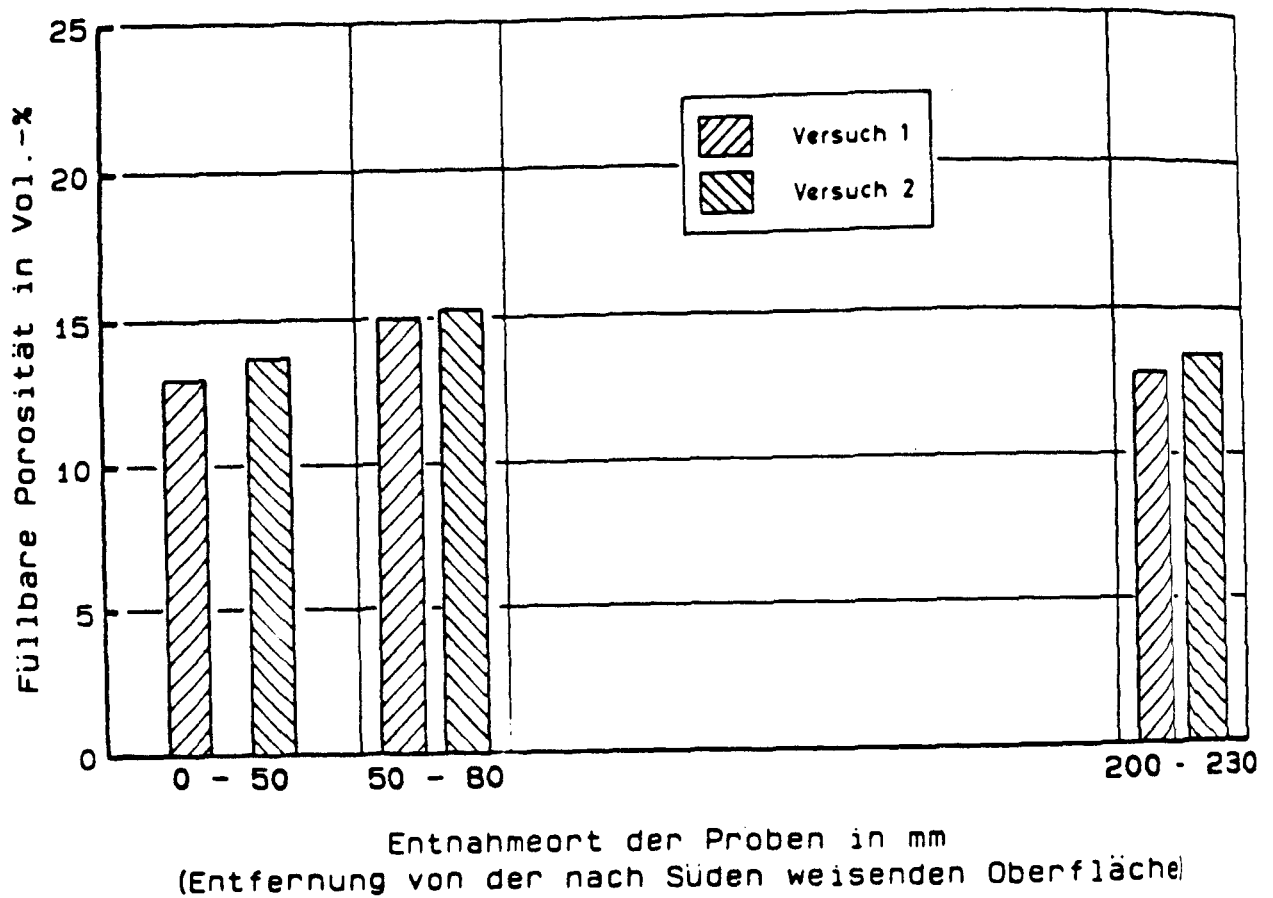


Bild D120

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand BF.

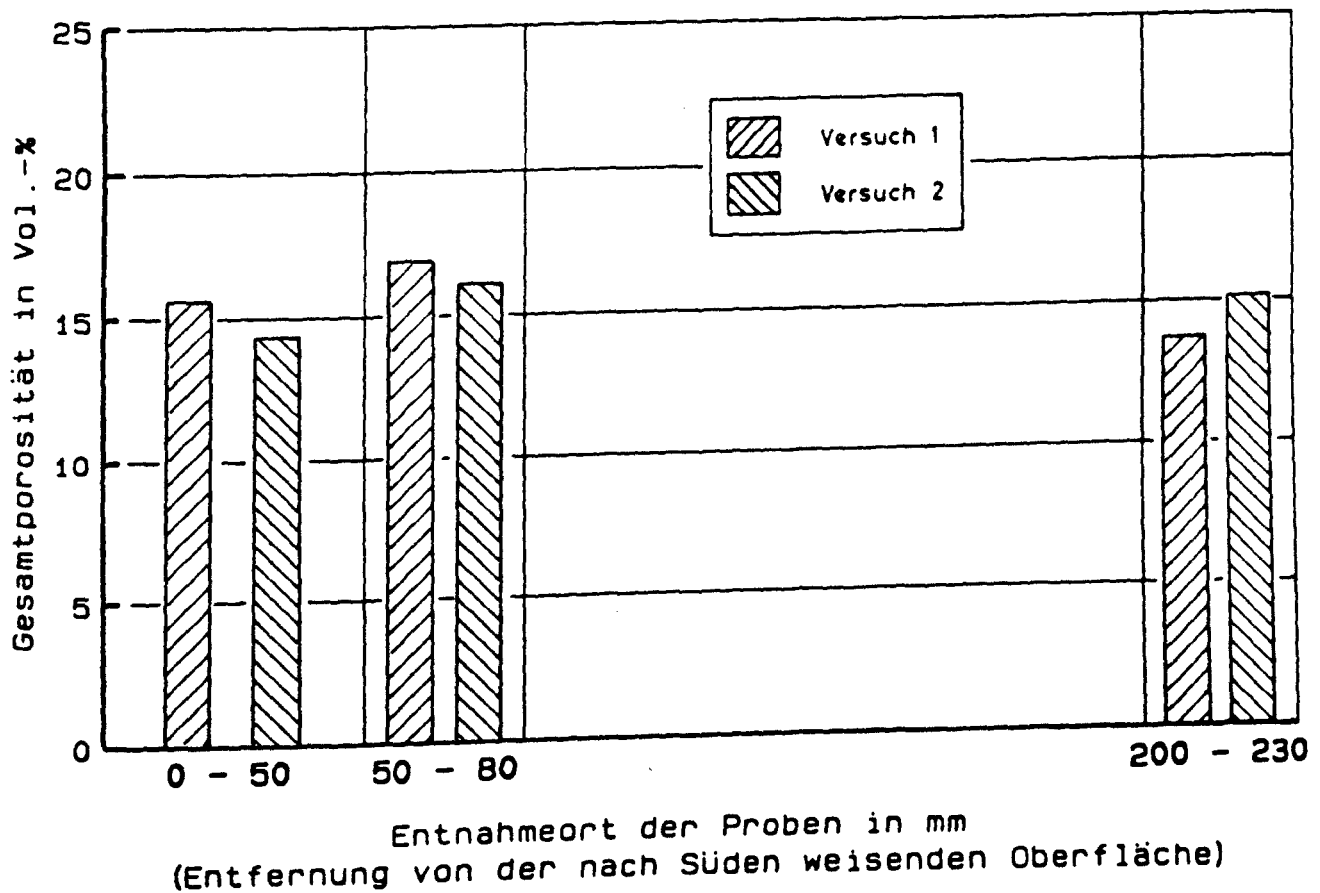
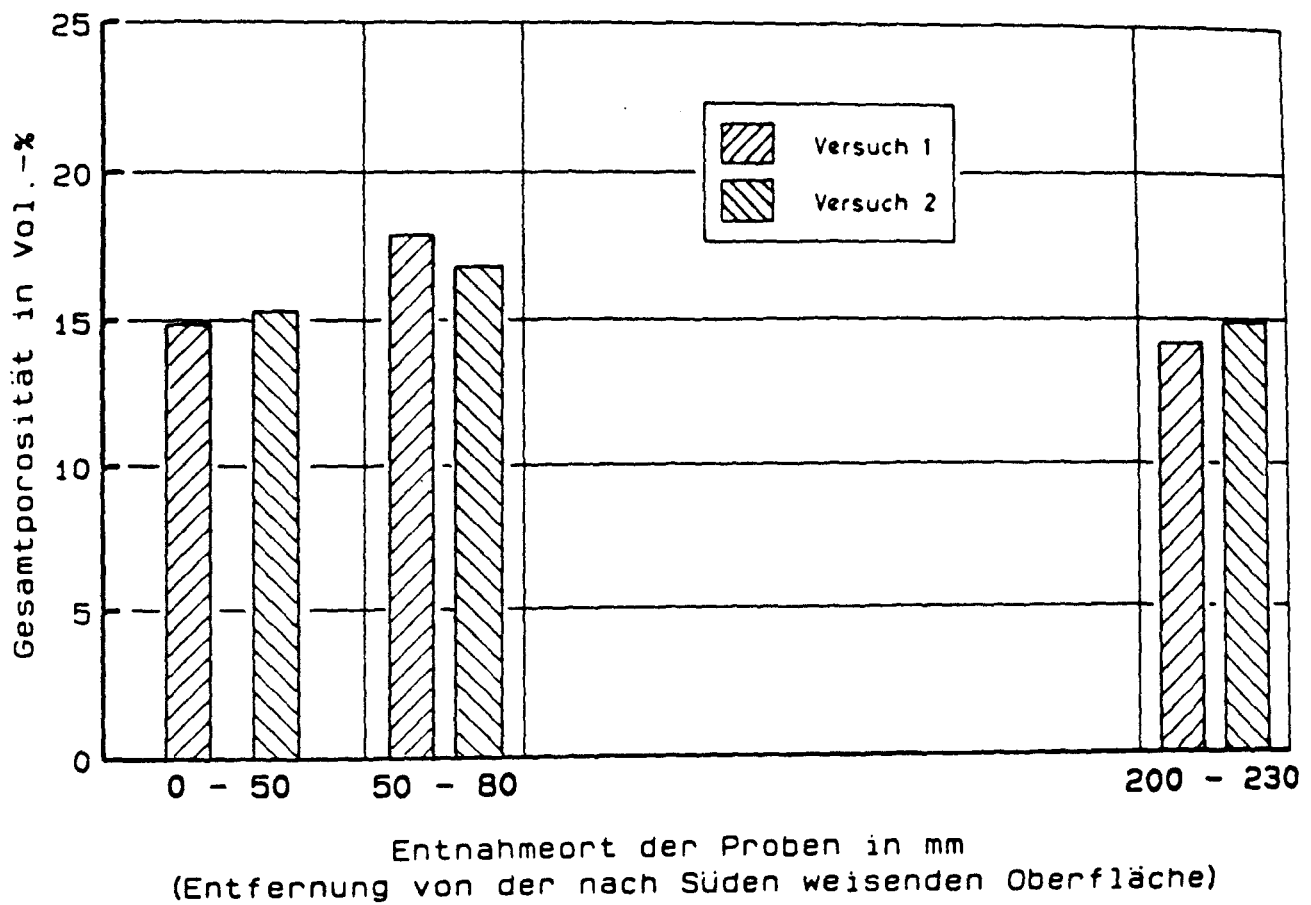


Bild D121

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand BF.

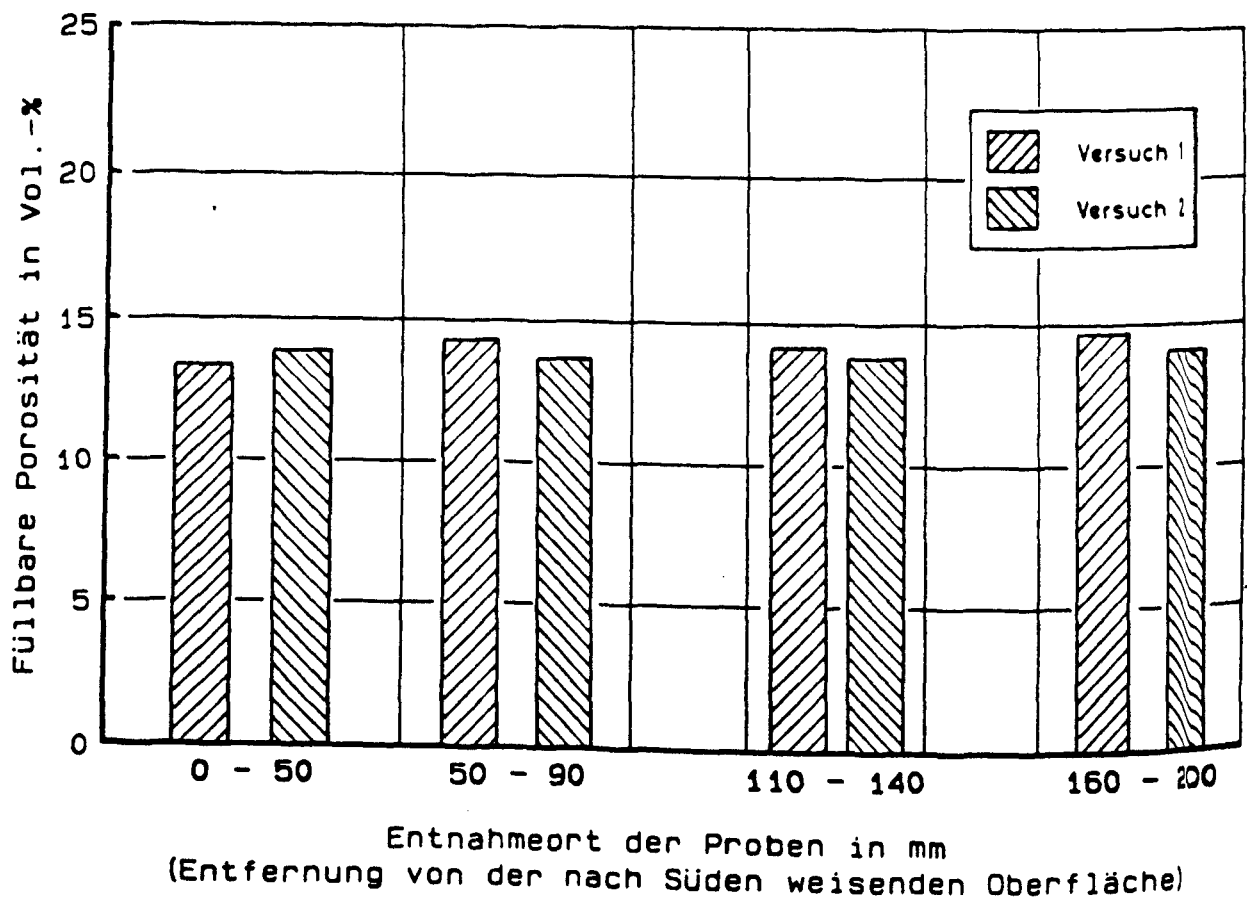
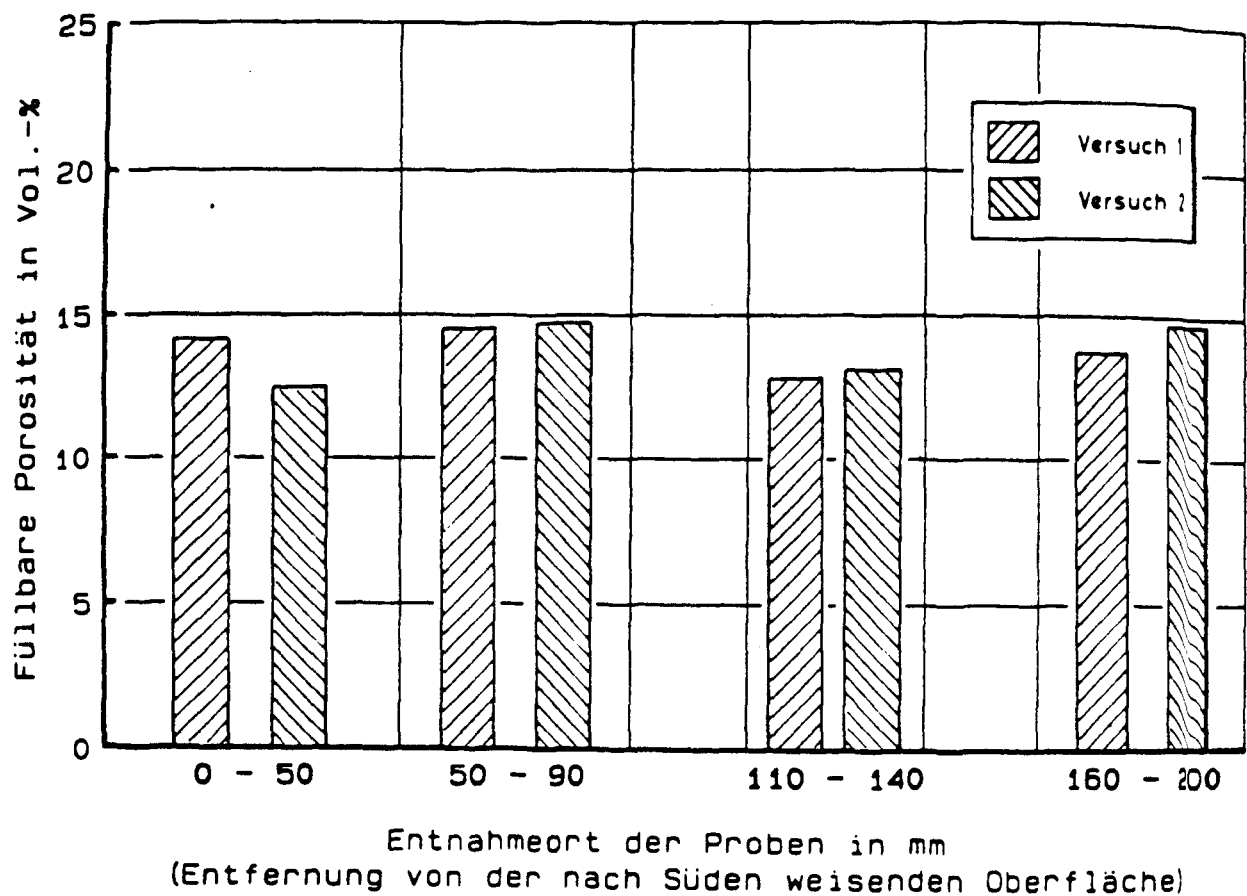


Bild D122

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand BL.

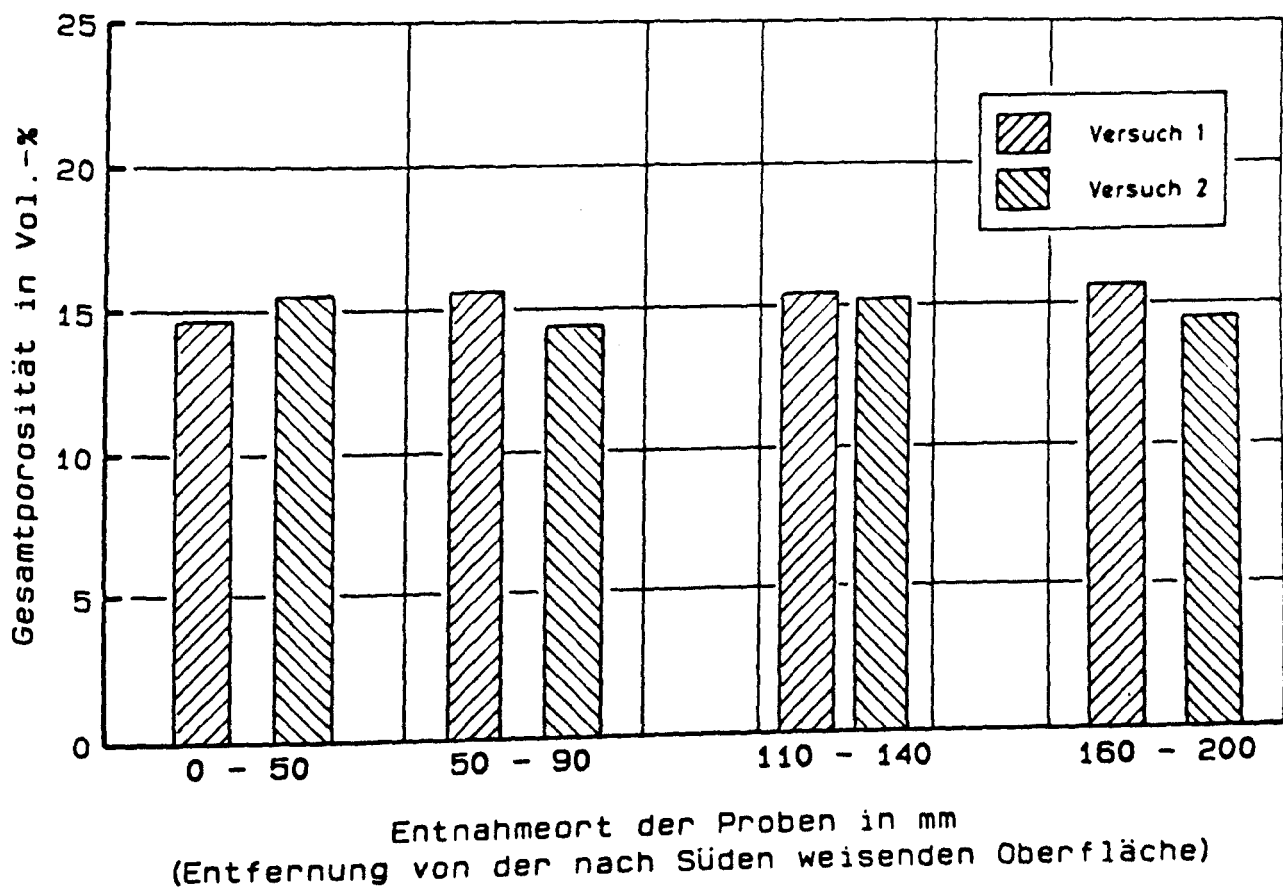
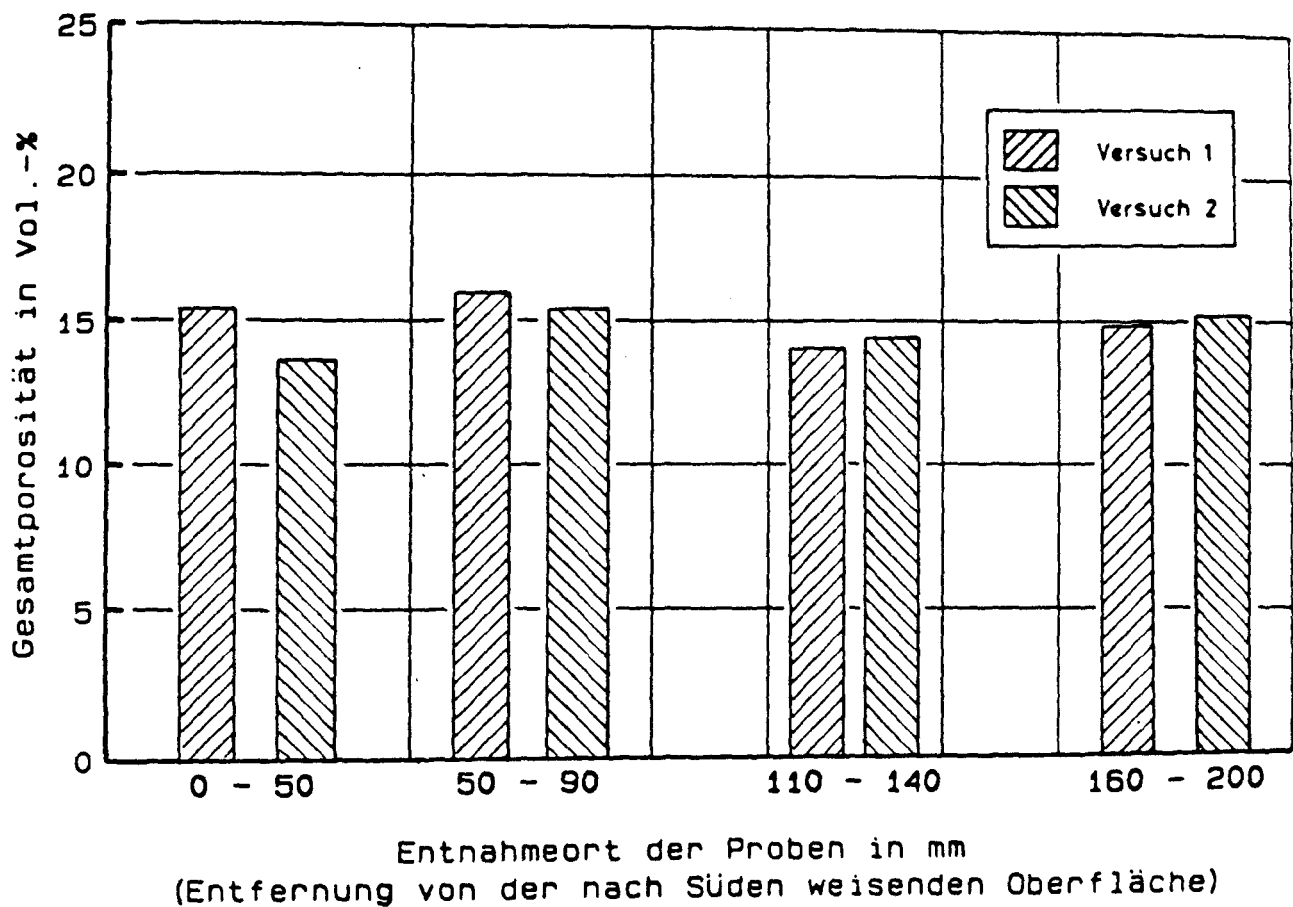


Bild D123

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand BL.

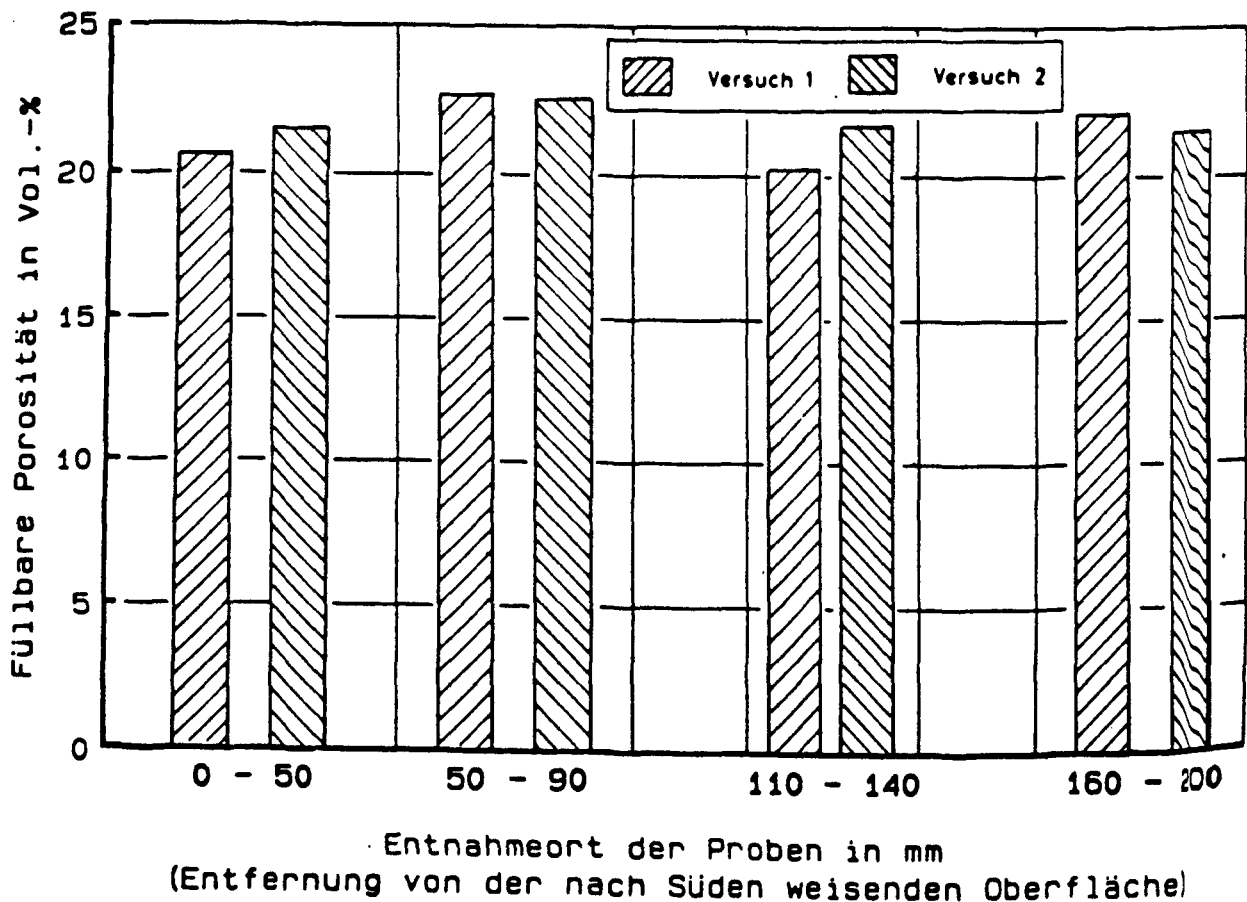
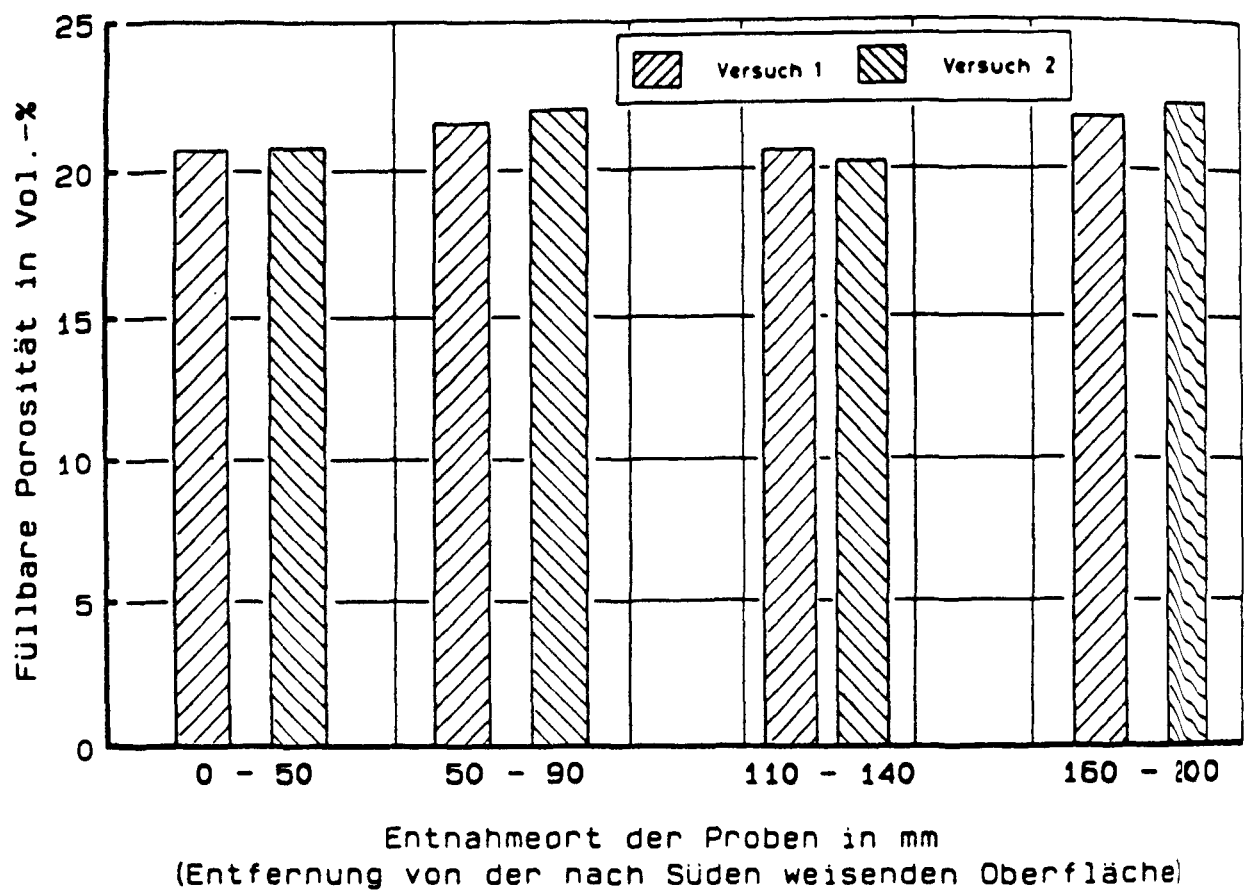


Bild D124

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte (unten) Wandhälfte der Wand D.

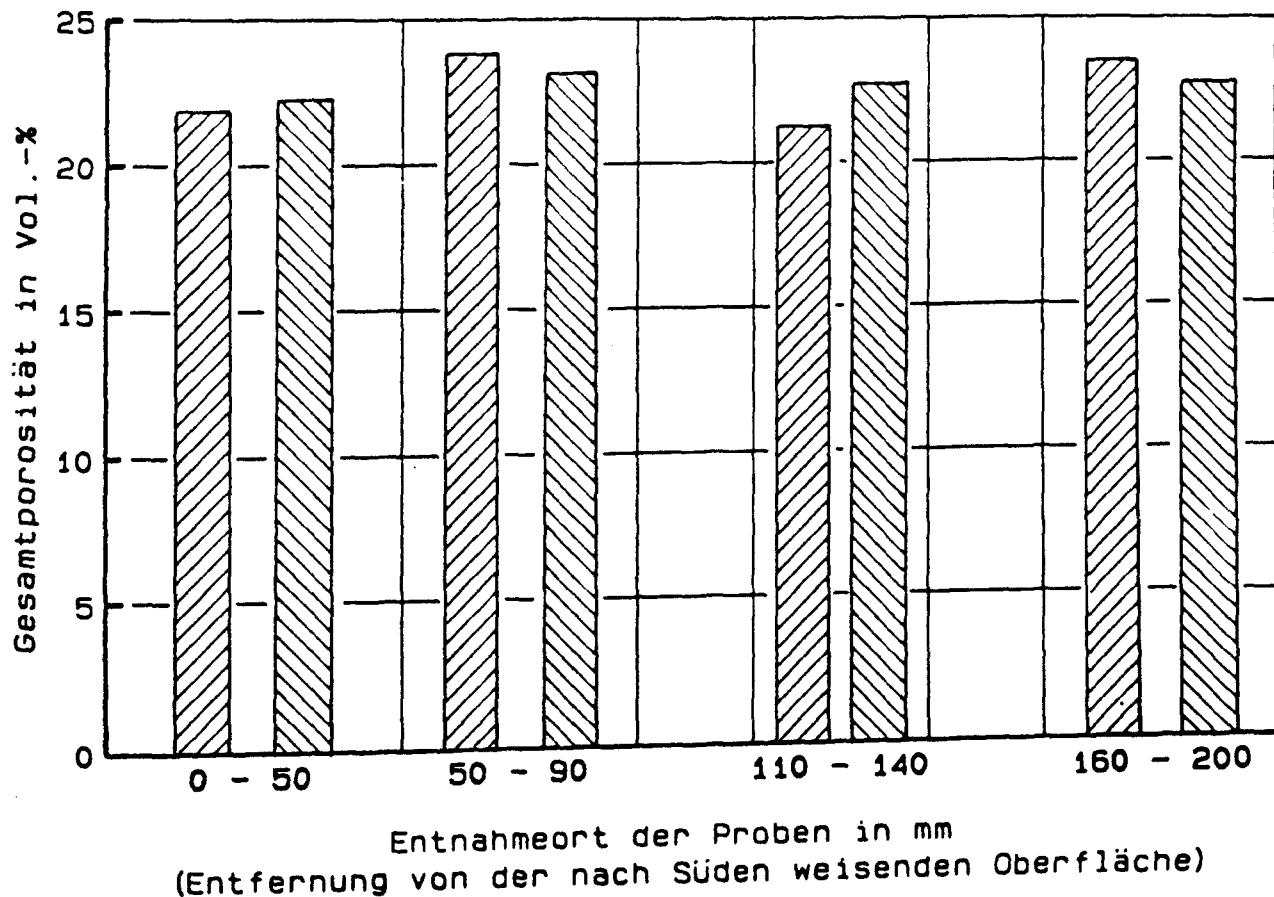
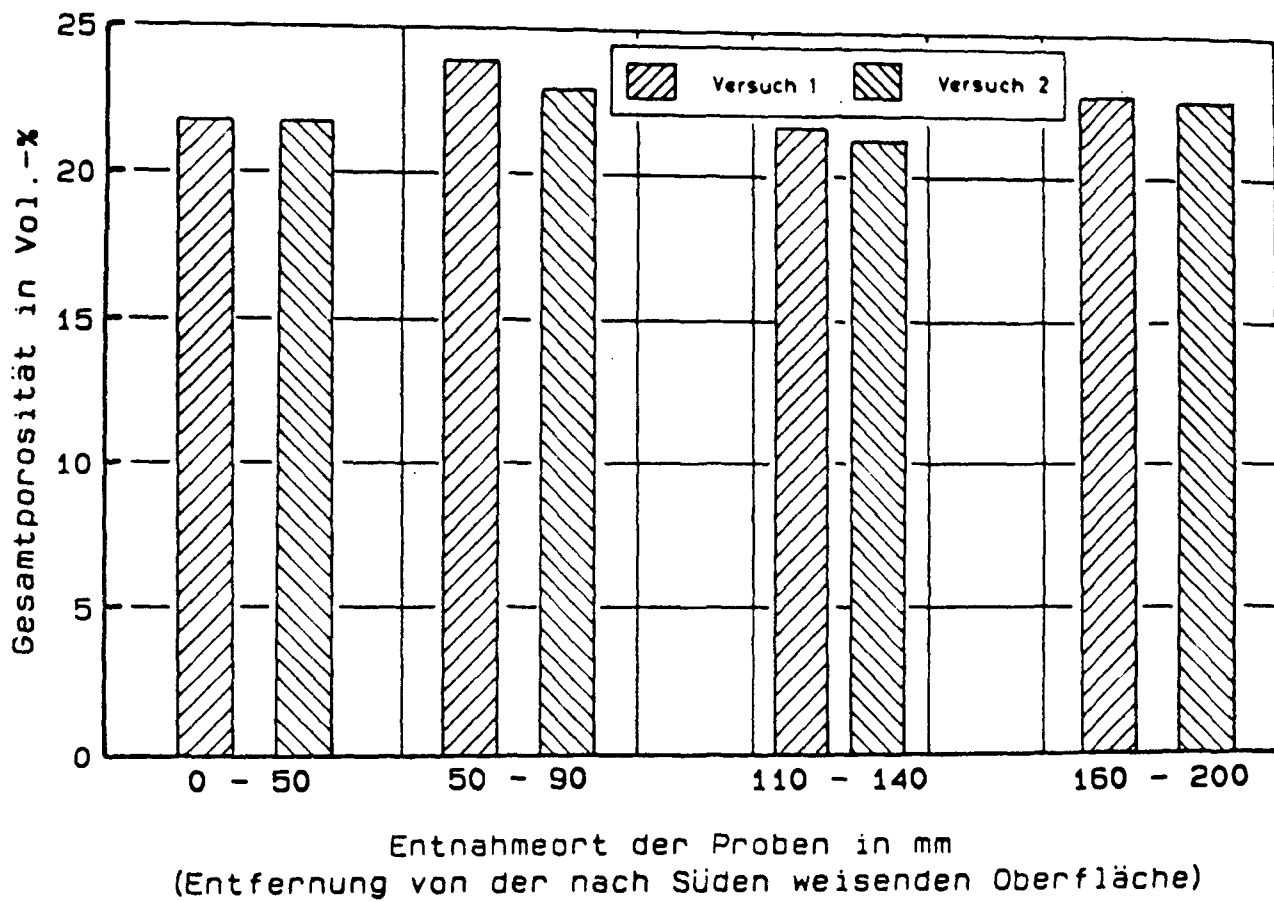


Bild D125

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben
für die nachbehandelte (oben) und die nicht nachbehandelte
(unten) Wandhälfte der Wand D.

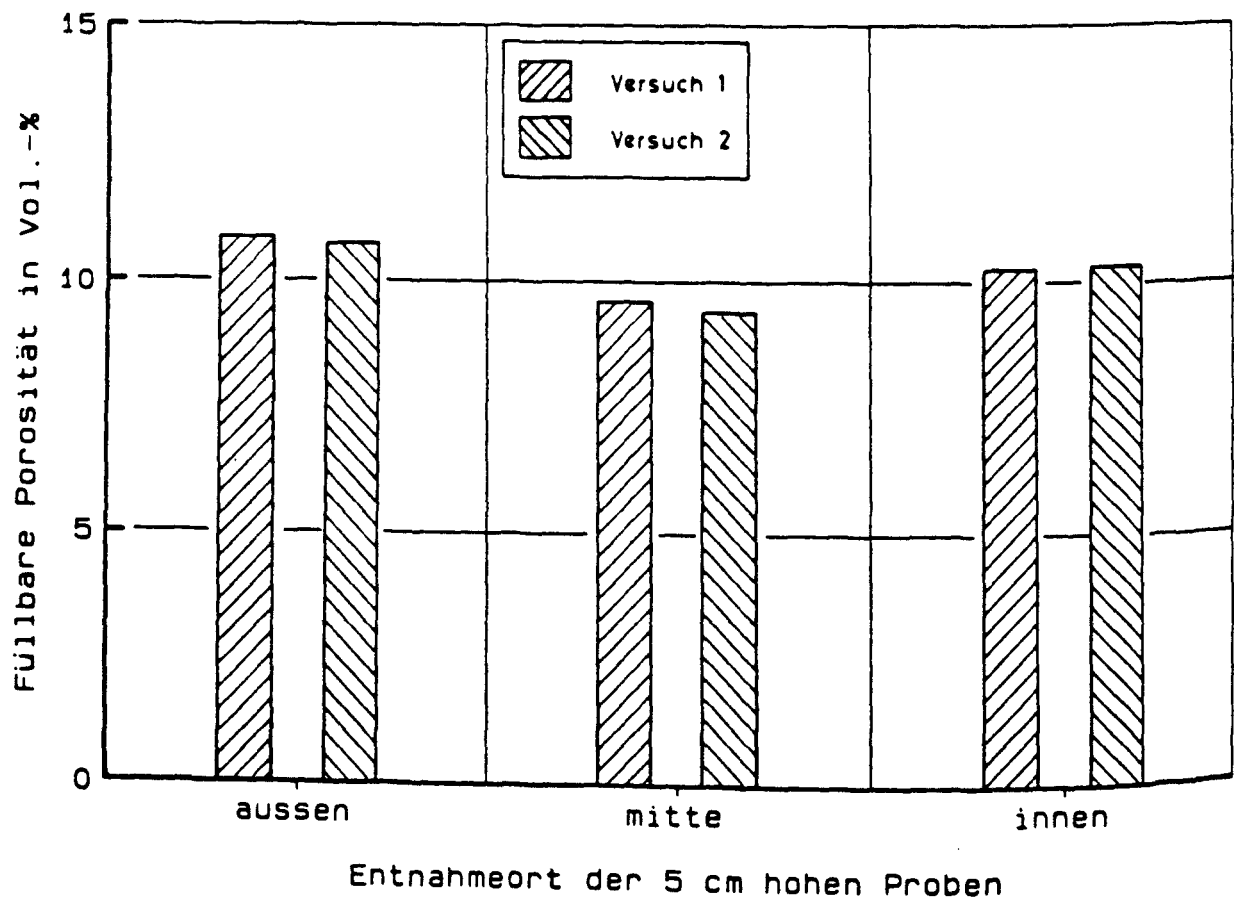
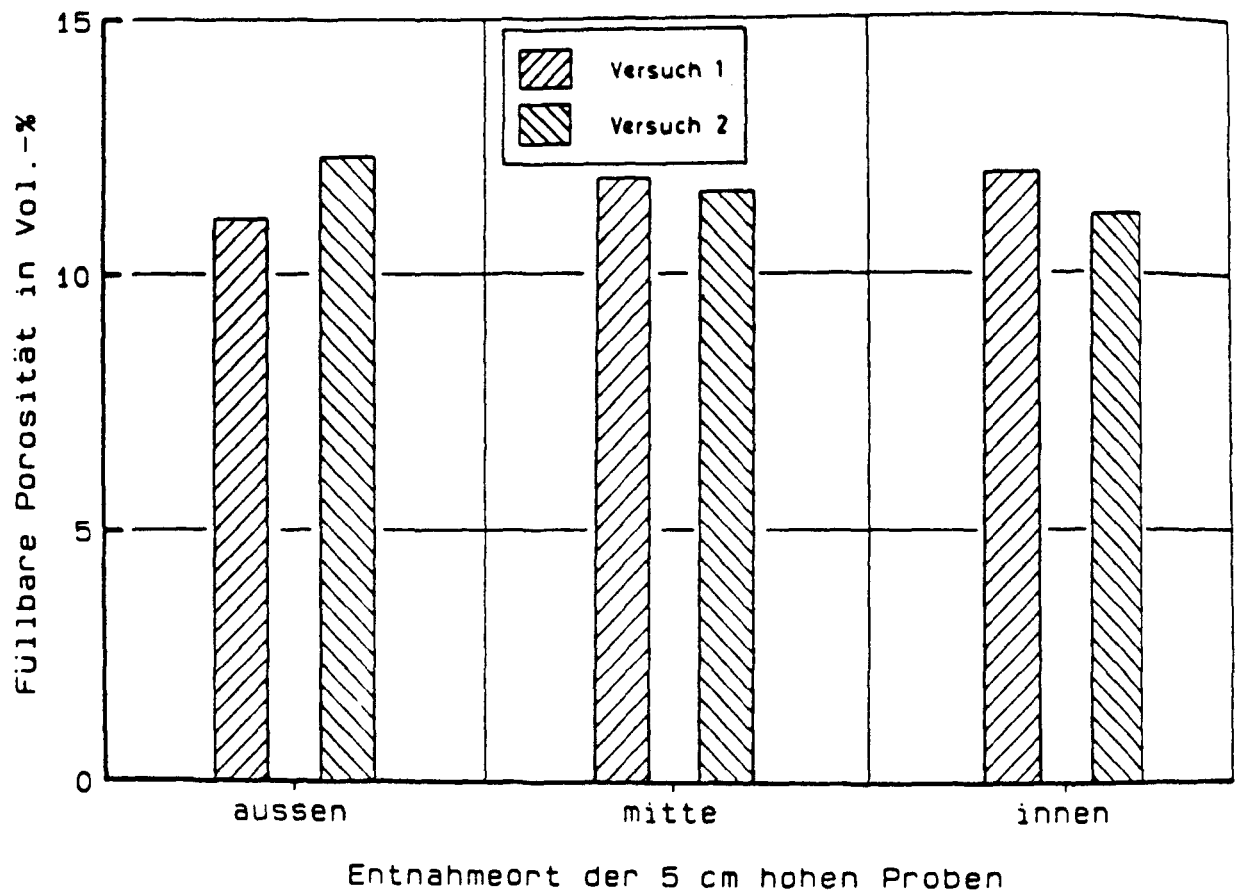


Bild D126

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für Versuchshaus 1 (oben) und Versuchshaus 2 (unten) in Beckum (Westwand).

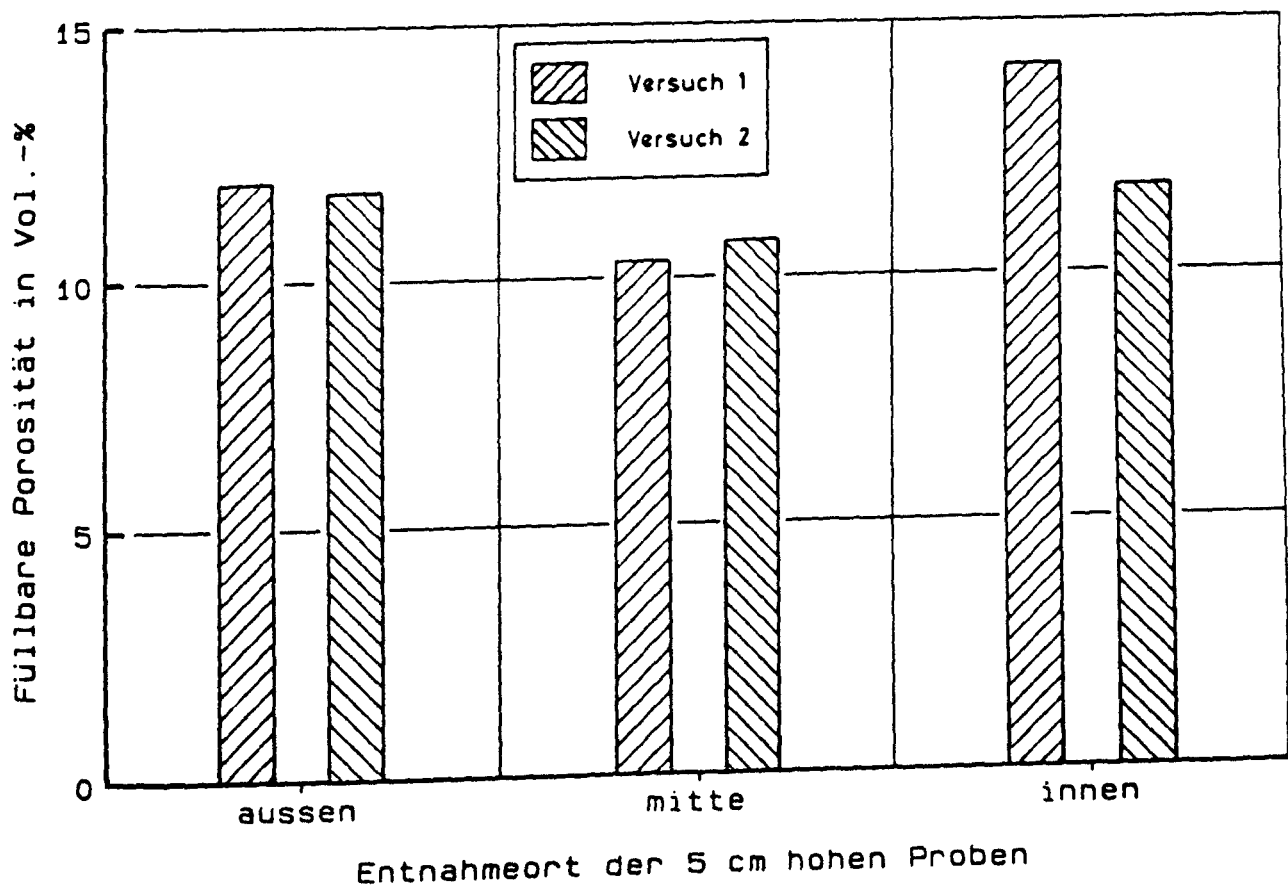
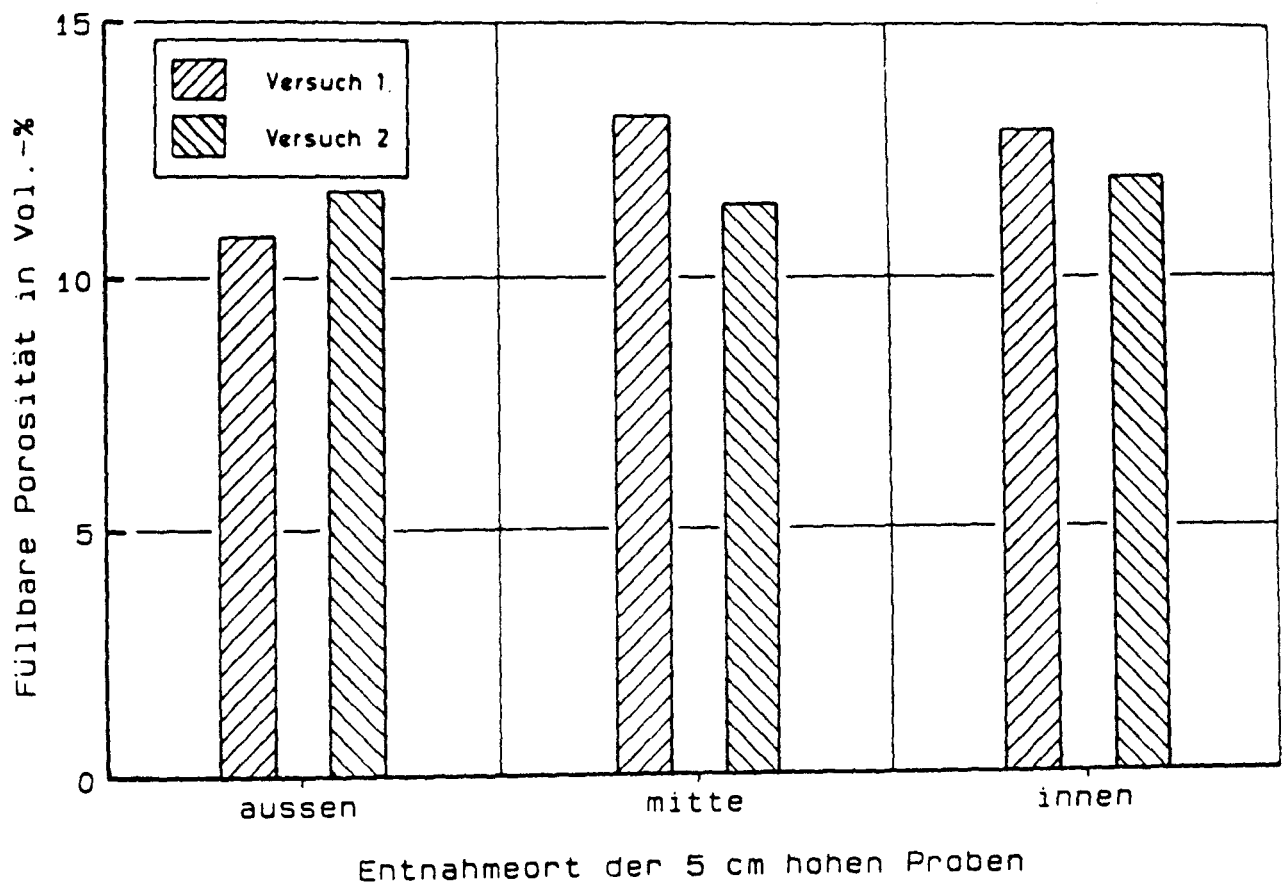


Bild D127

Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom Entnahmeort der Proben für Versuchshaus 3 (oben) und Versuchshaus 4 (unten) in Beckum (Westwand).

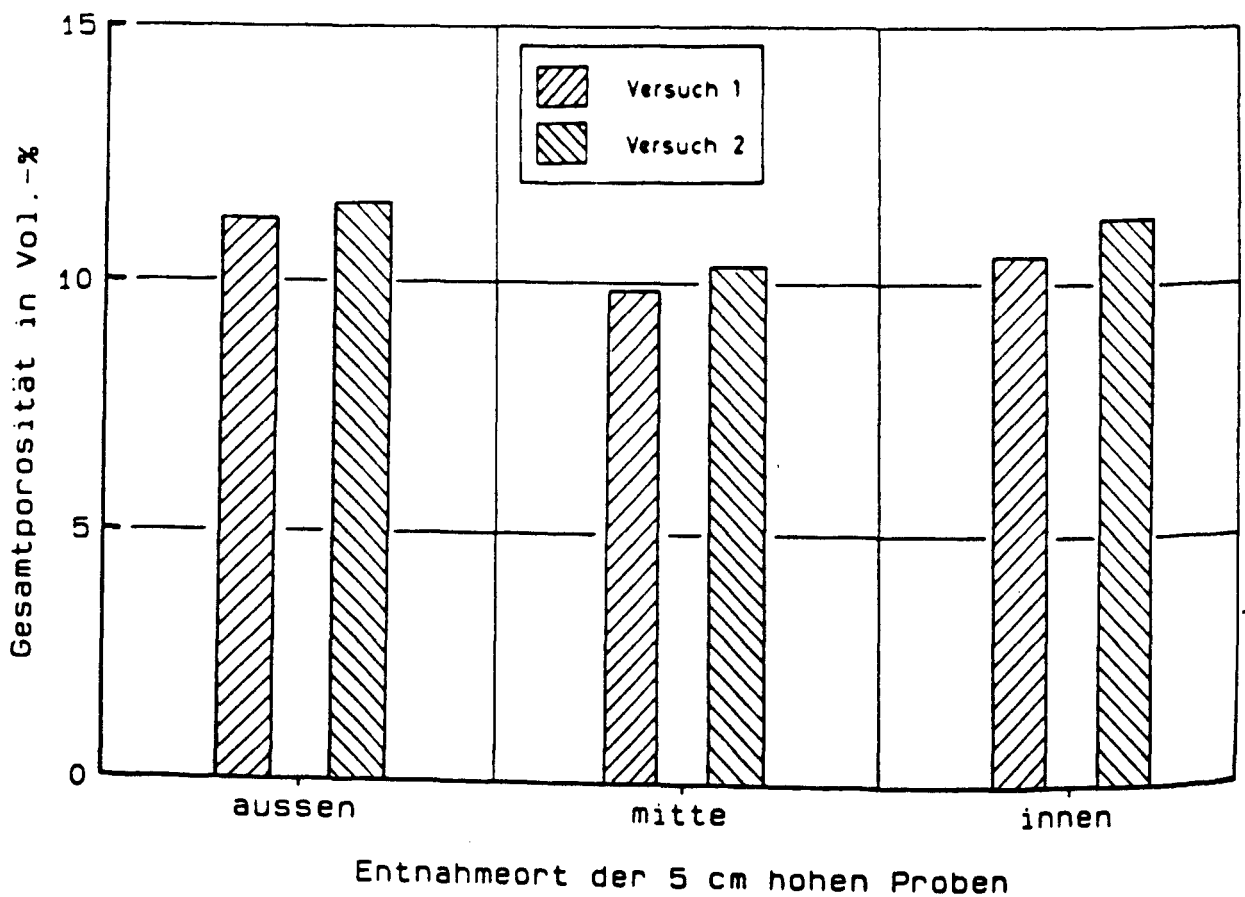
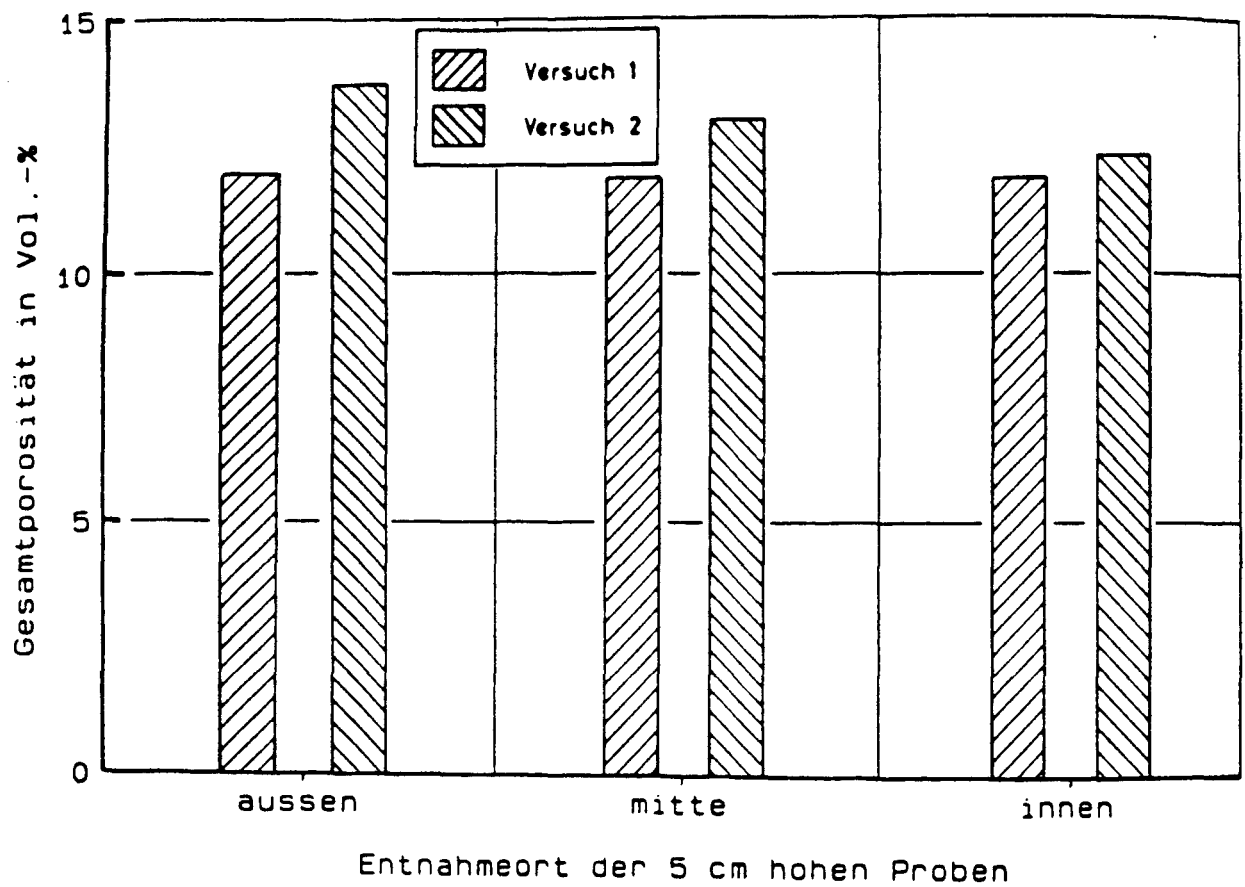


Bild D128

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für Versuchshaus 1 (oben) und Versuchshaus 2 (unten) in Beckum (Westwand).

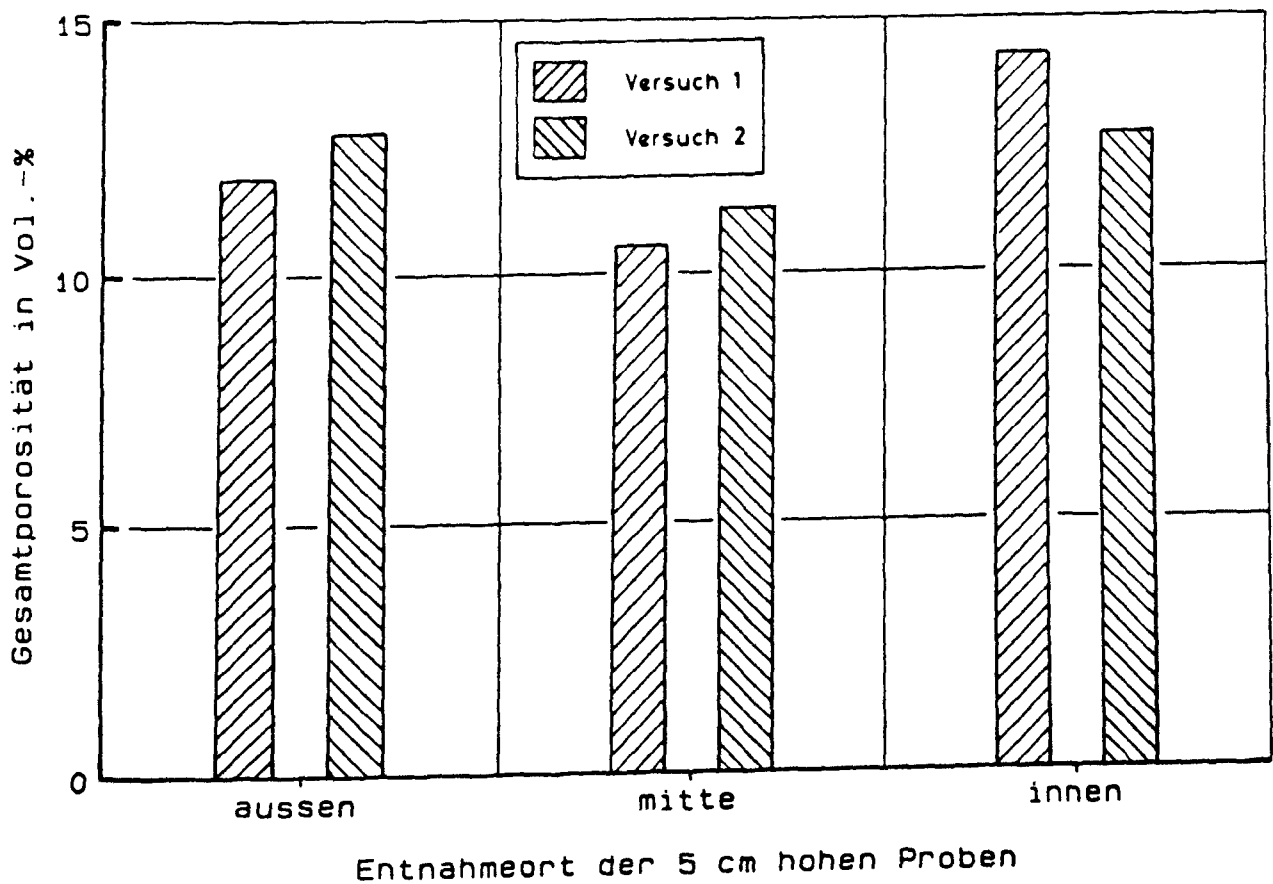
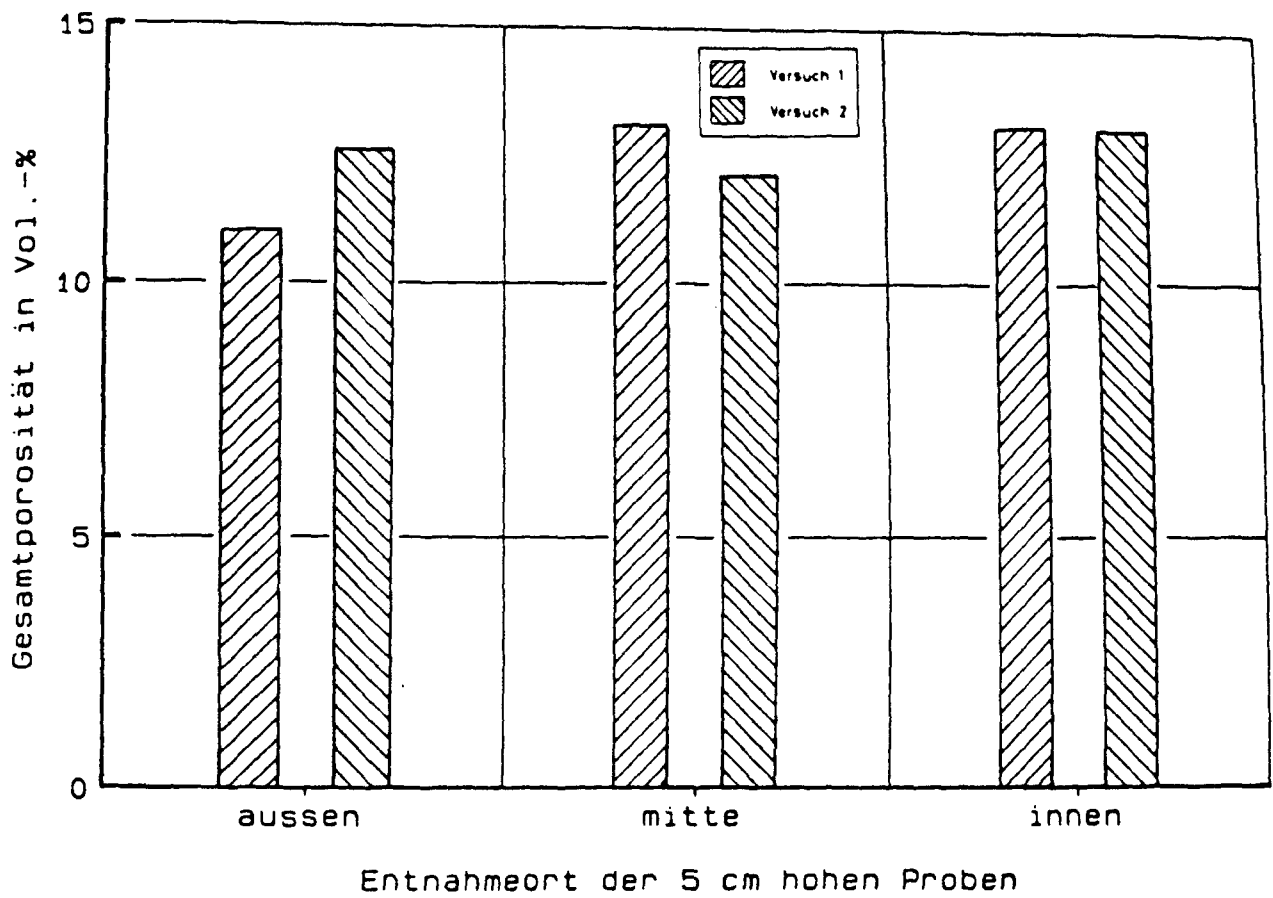


Bild D129

Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Entnahmeort der Proben für Versuchshaus 3 (oben) und Versuchshaus 4 (unten) in Beckum (Westwand).

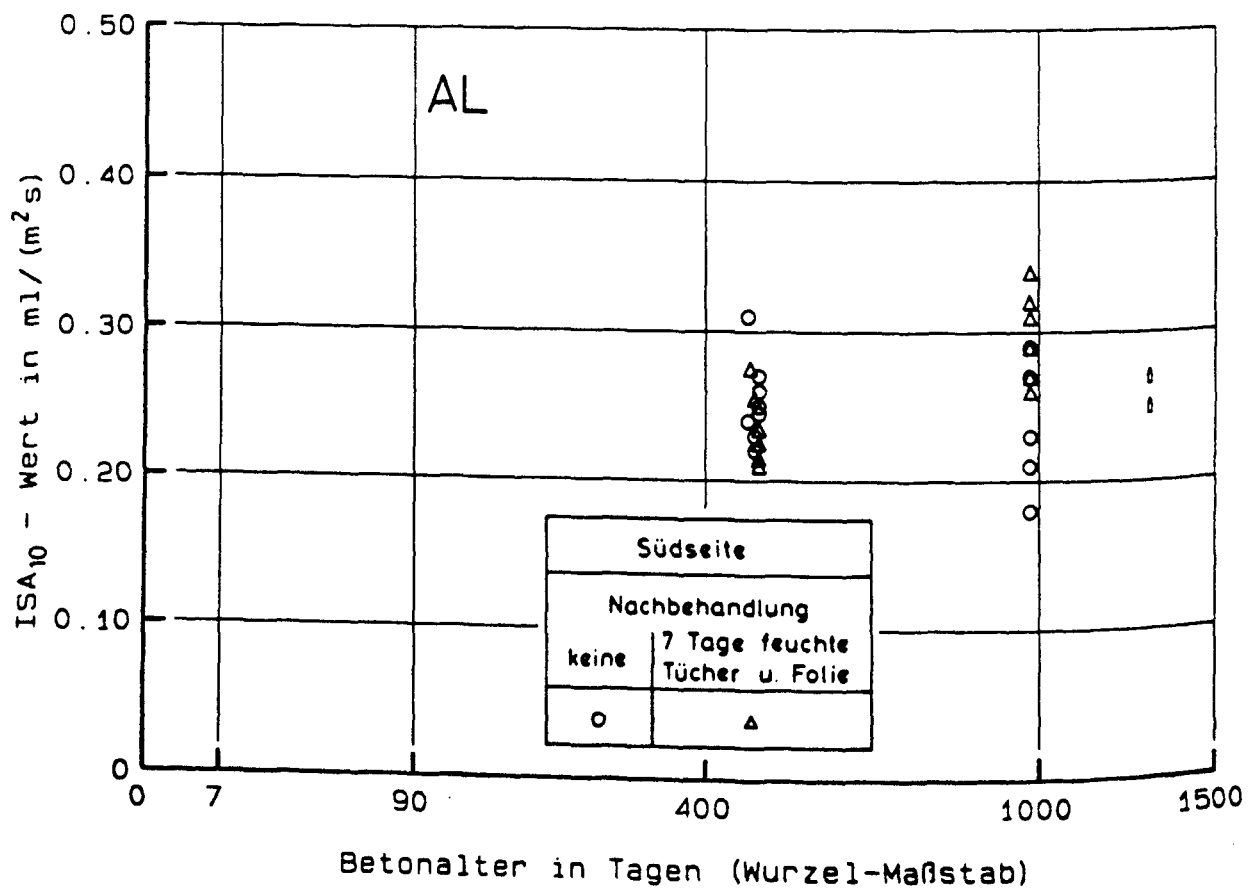
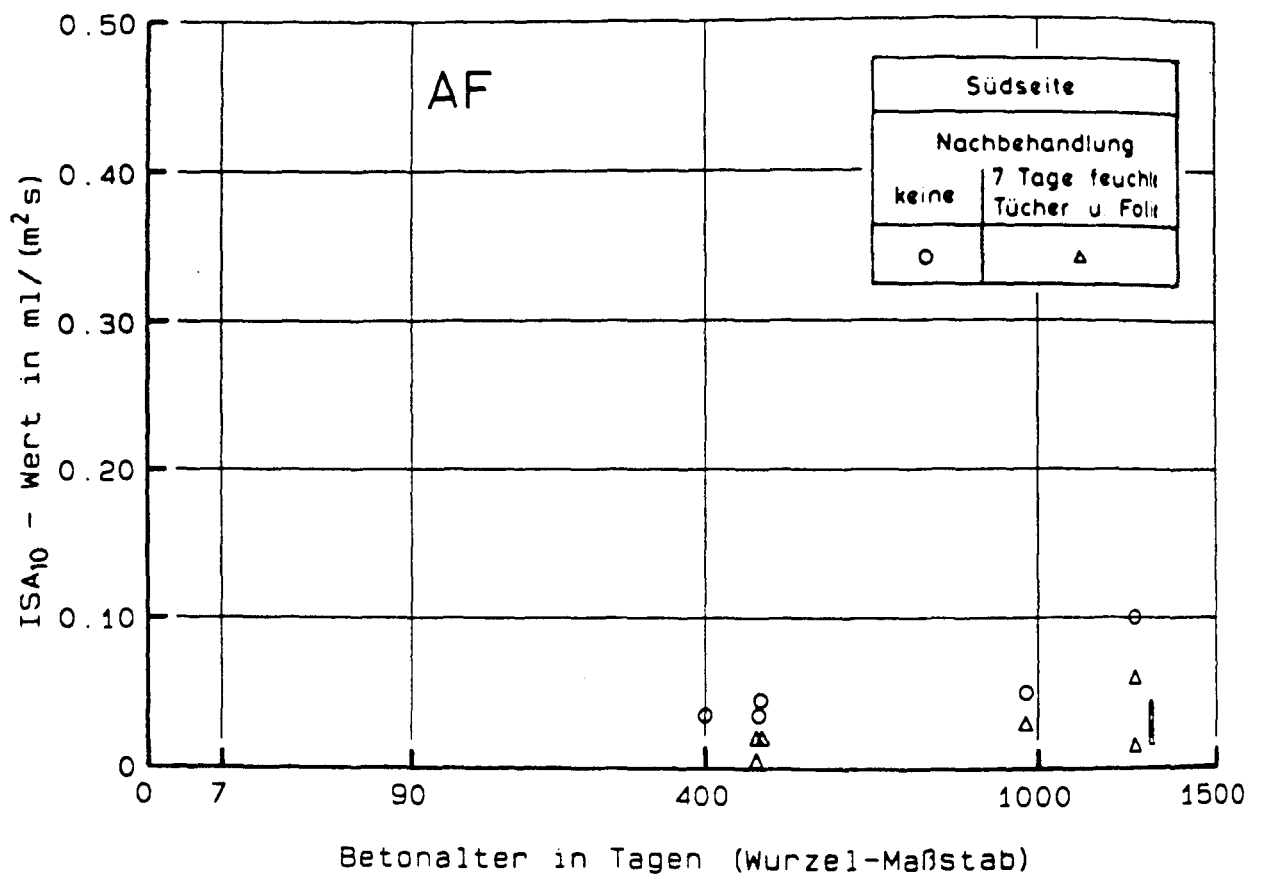


Bild D130

Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀ - Wertes für die Südseite der unterschiedlich nachbehandelten Wandhälften von Wand AF (oben) und Wand AL (unten).

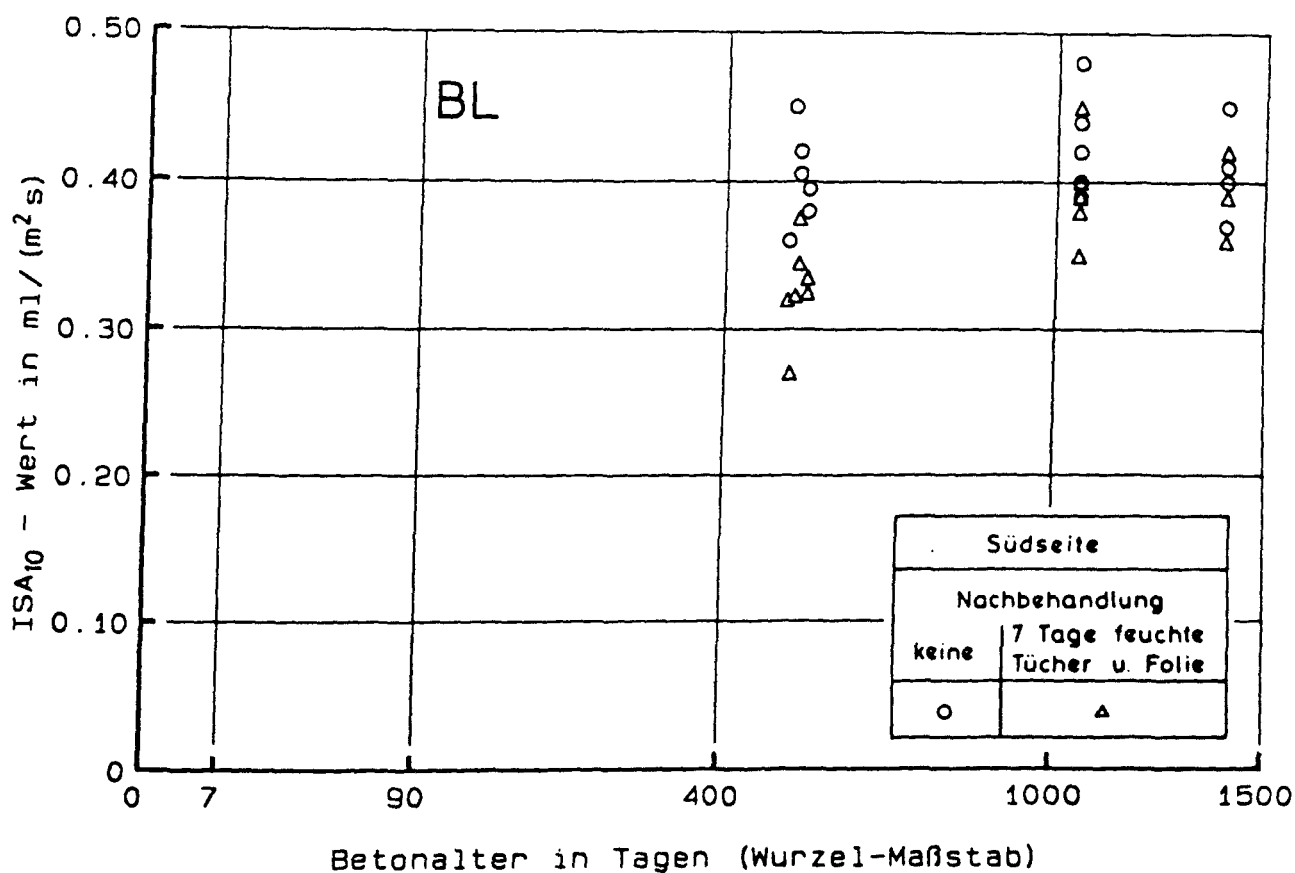
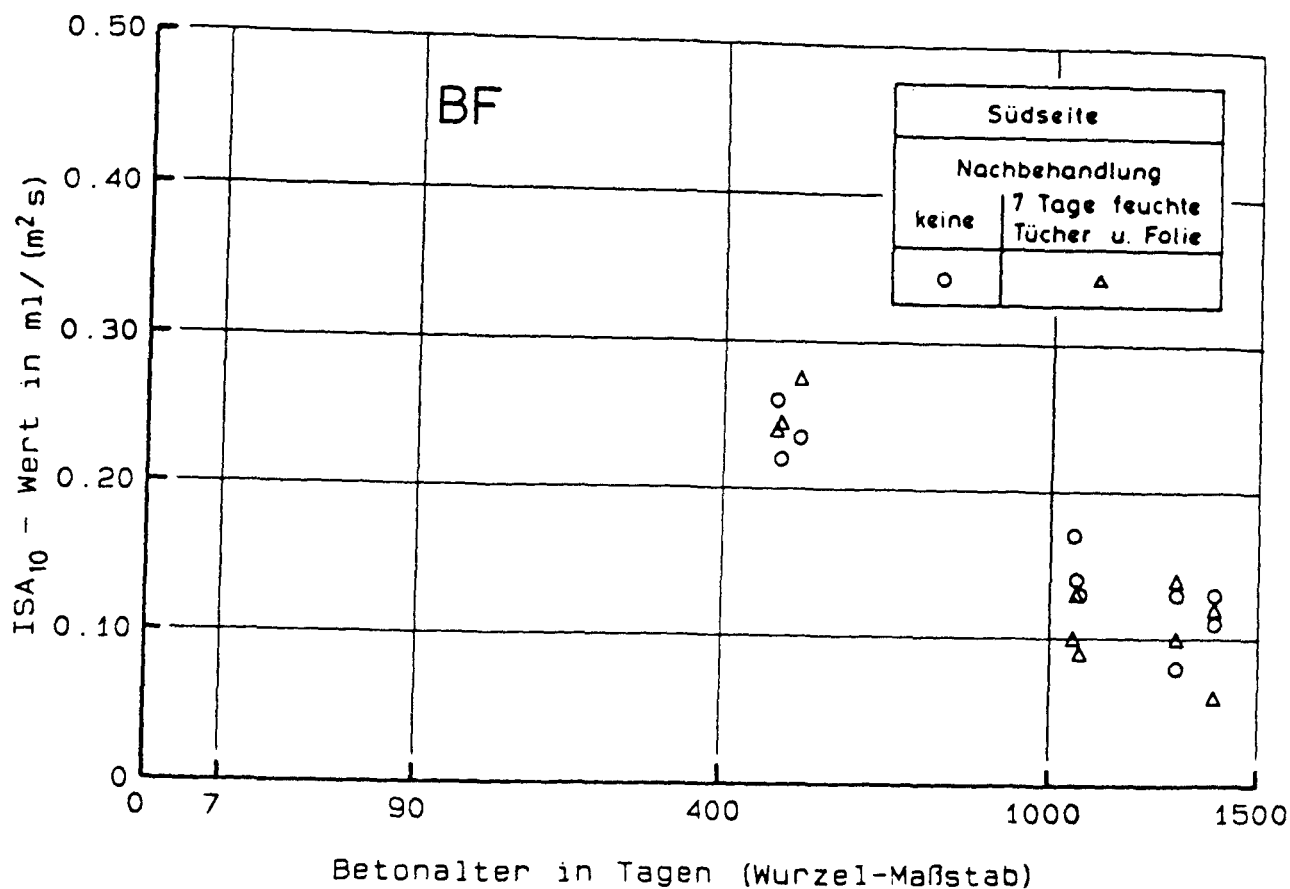


Bild D131

Zeitliche Entwicklung des ISA_{10} - Wertes für die Südseite der unterschiedlich nachbehandelten Wandhälften von Wand BF (oben) und Wand BL (unten).

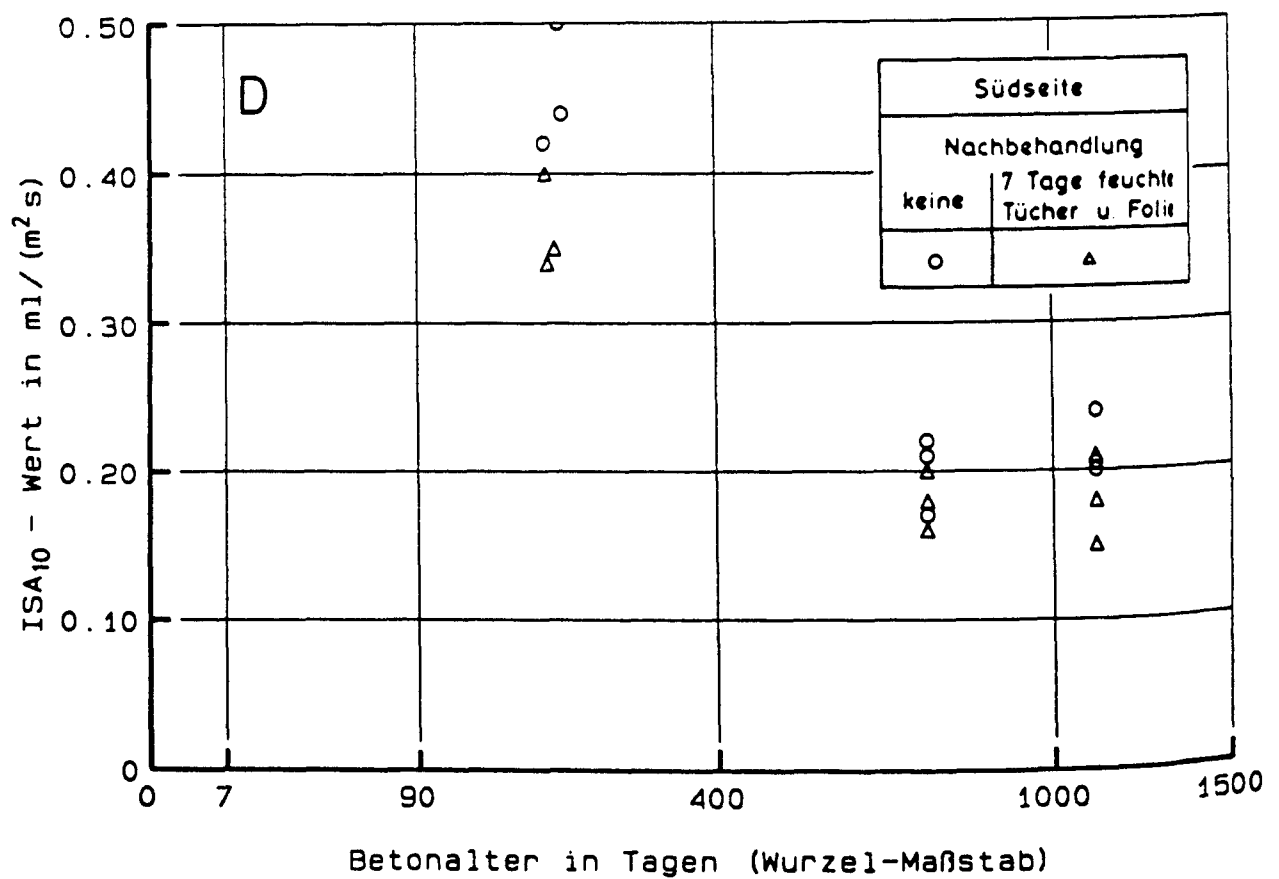


Bild D132

Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀ - Wertes für die Südseite der unterschiedlich nachbehandelten Wandhälften von Wand D.

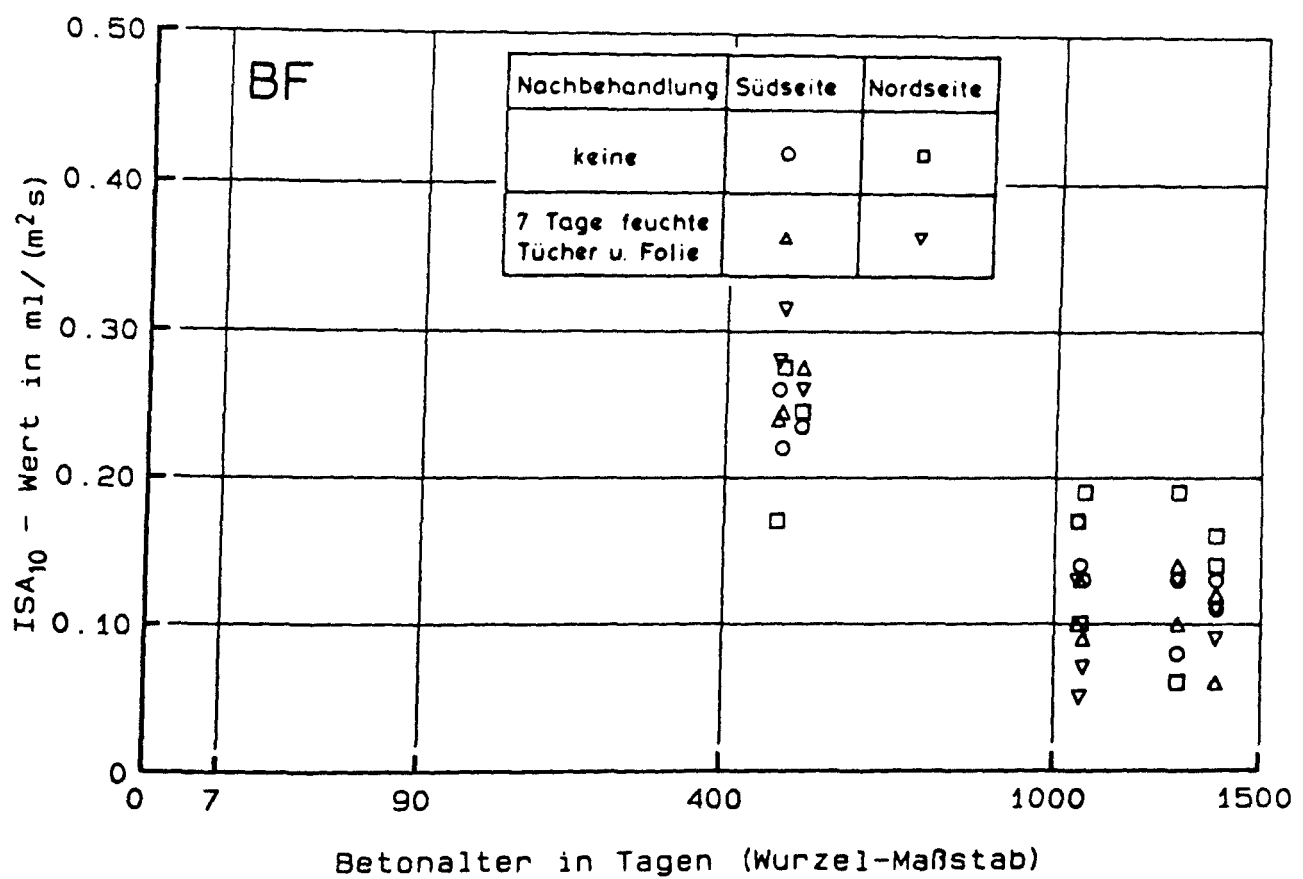


Bild D133

Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀ - Wertes im Vergleich zwischen Süd- und Nordseite der unterschiedlich nachbehandelten Wandhälften von Wand BF.

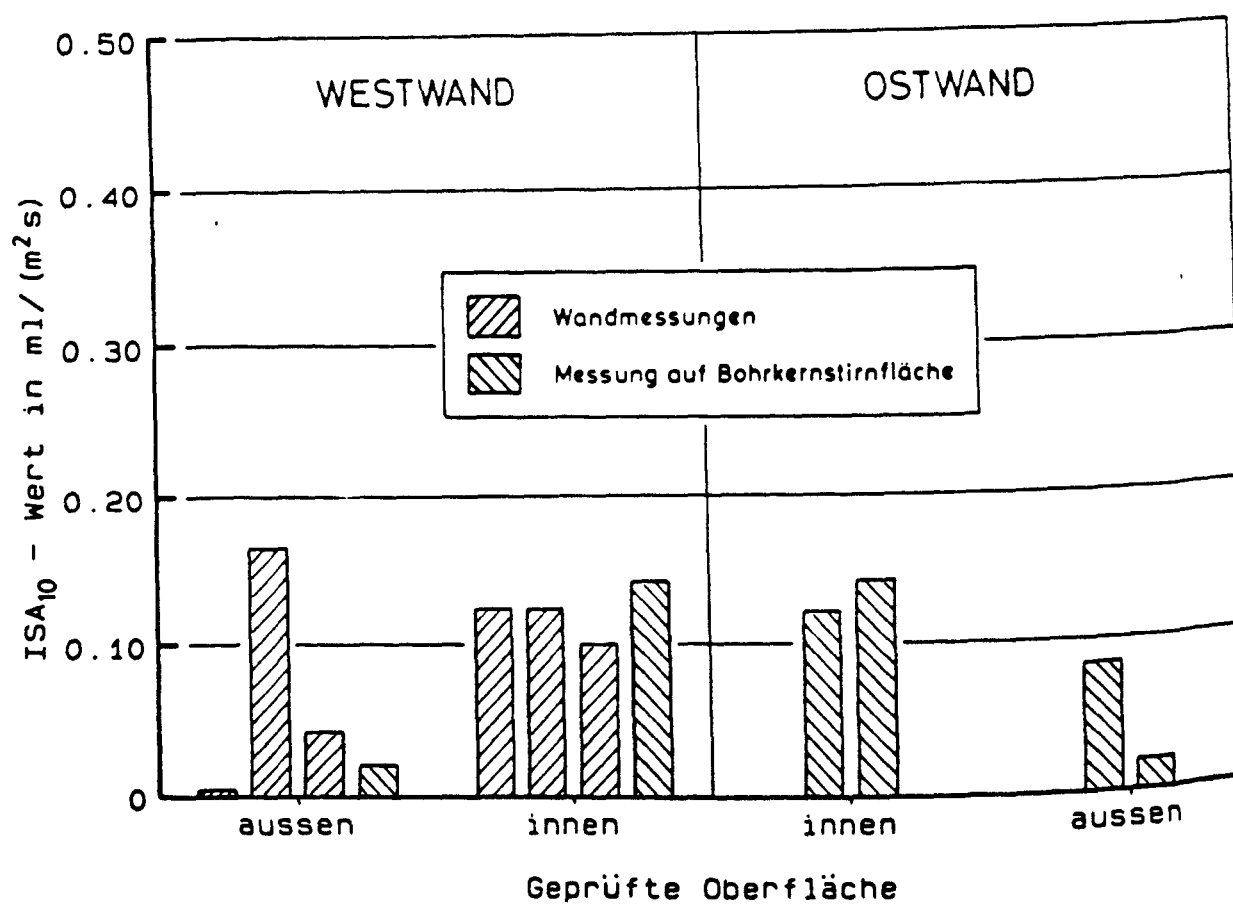


Bild D134

ISA_{10} - Werte des Versuchshauses 1 aus Beckum.

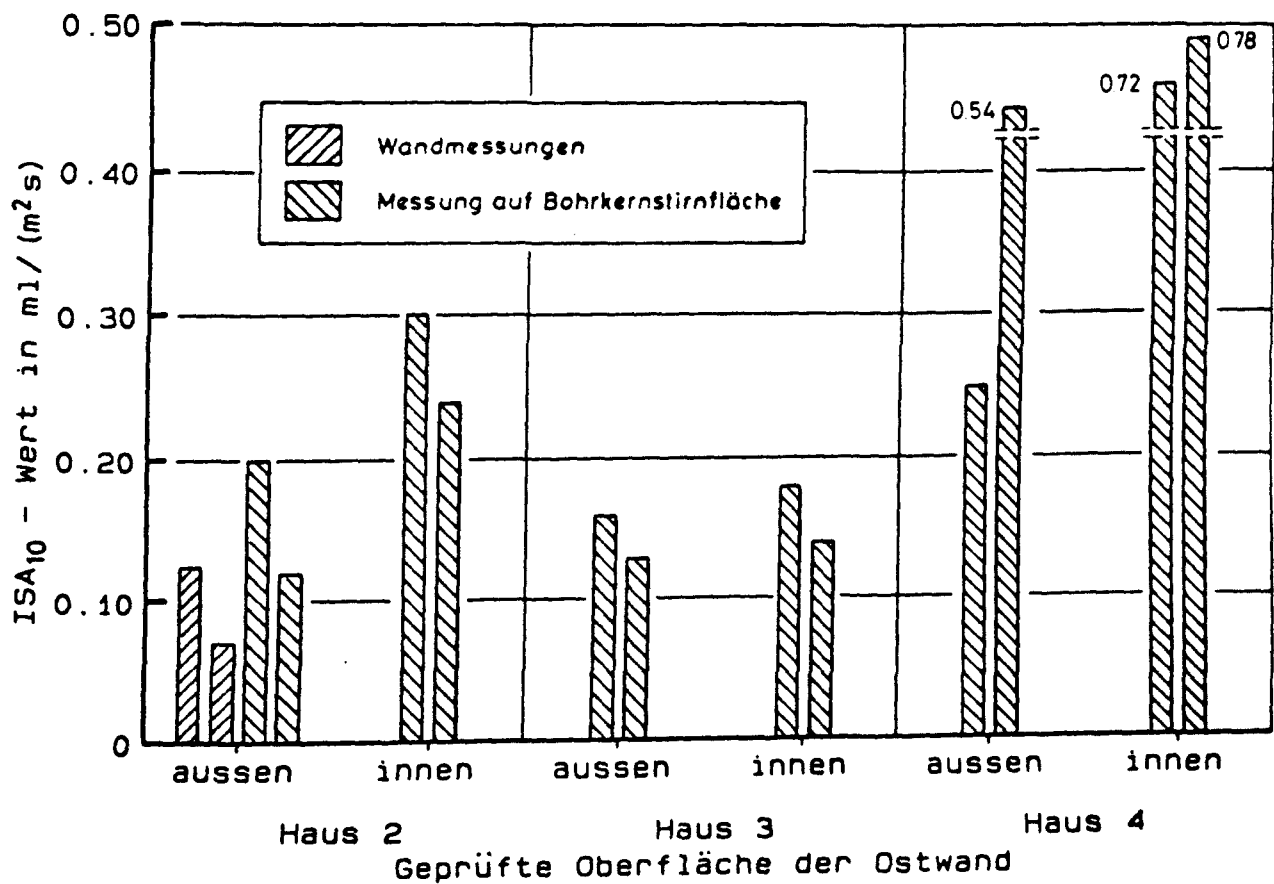
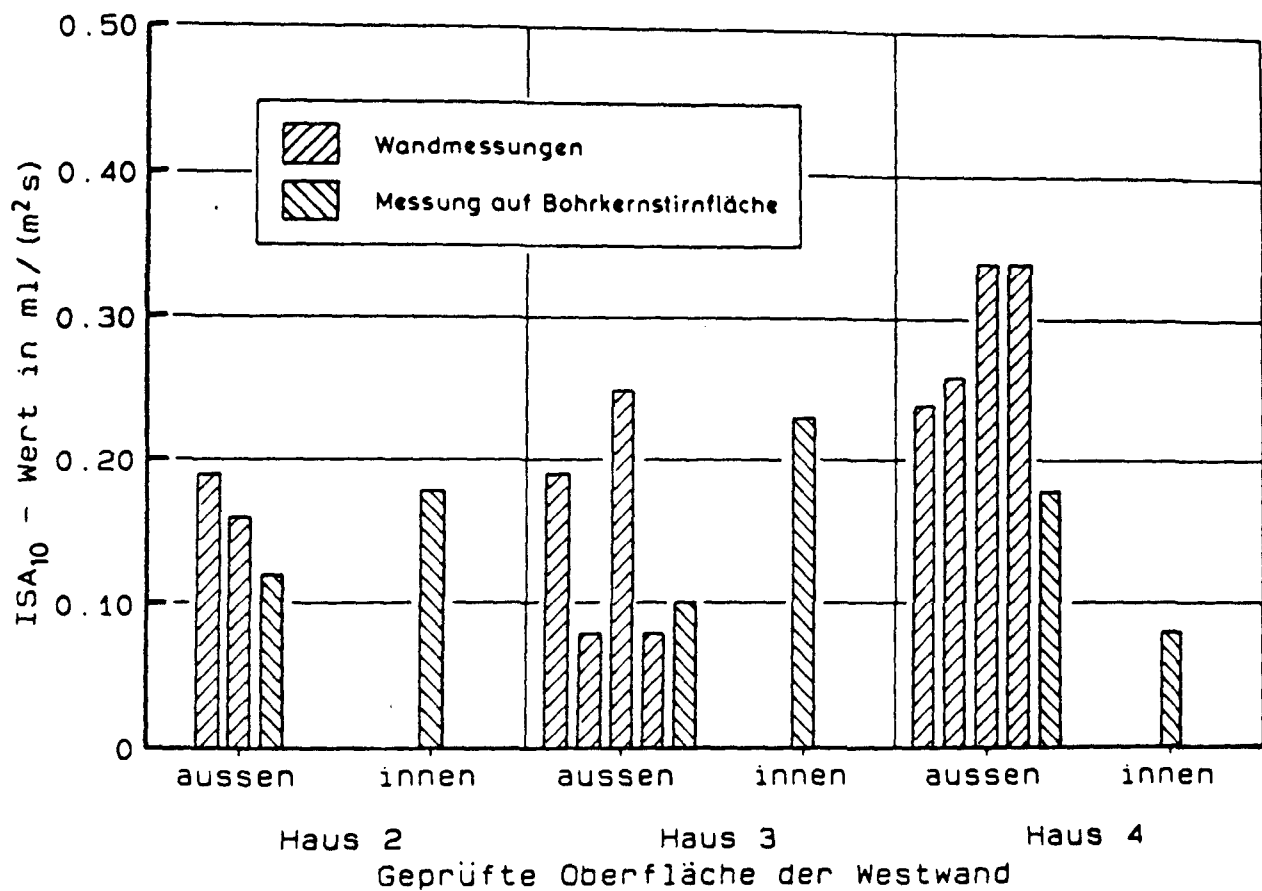


Bild D135

ISA₁₀ - Werte der Versuchshäuser 2 - 4 aus Beckum.
 obere Bildhälfte: Messungen für die Westwand.
 untere Bildhälfte: Messungen für die Ostwand.

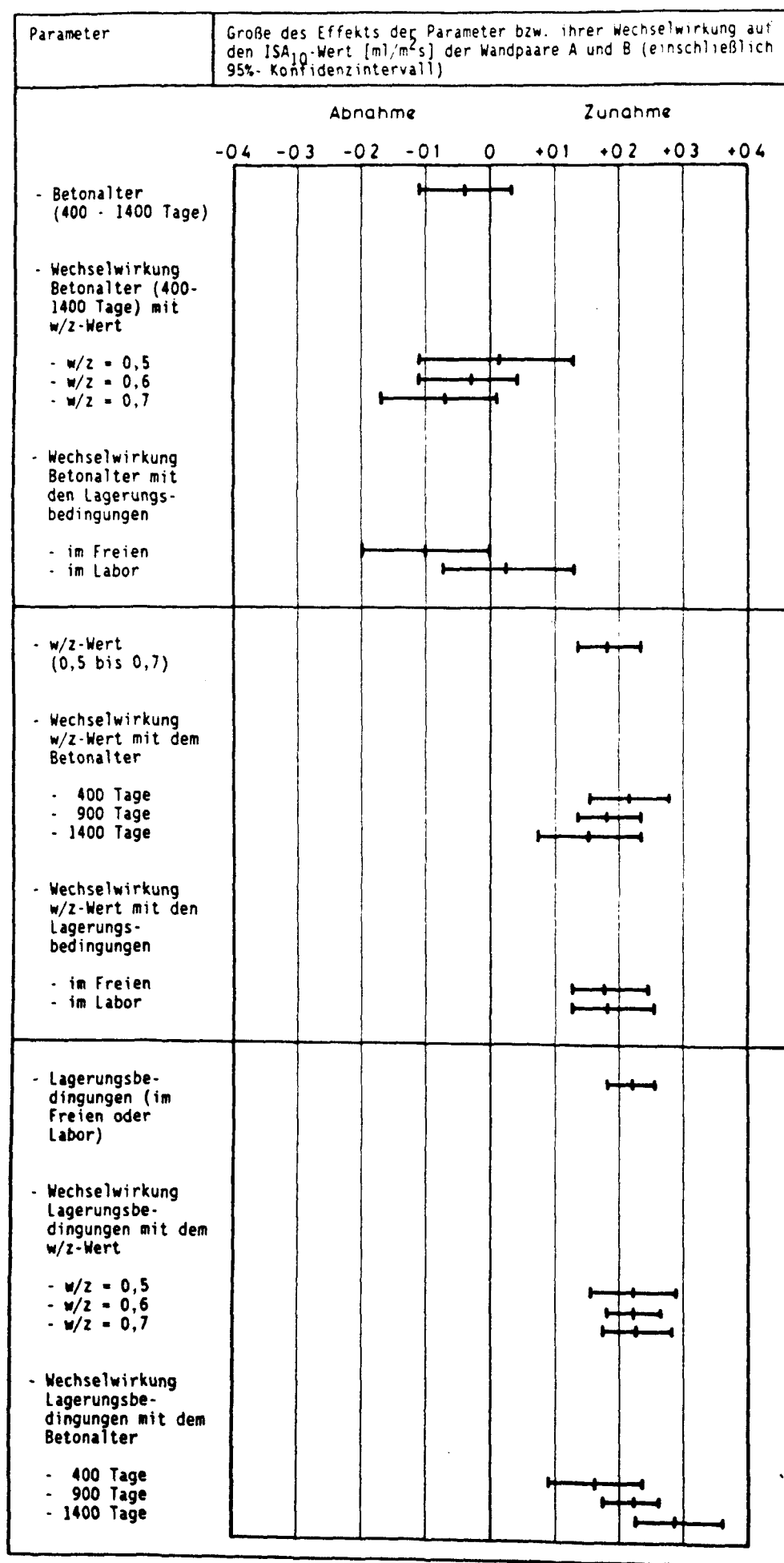


Bild D136: Einzel- und Wechselwirkungseffekte der Parameter Betonalter, w/z - Wert und Lagerungsbedingungen auf den ISA_{10} - Wert der Wandpaare A und B.

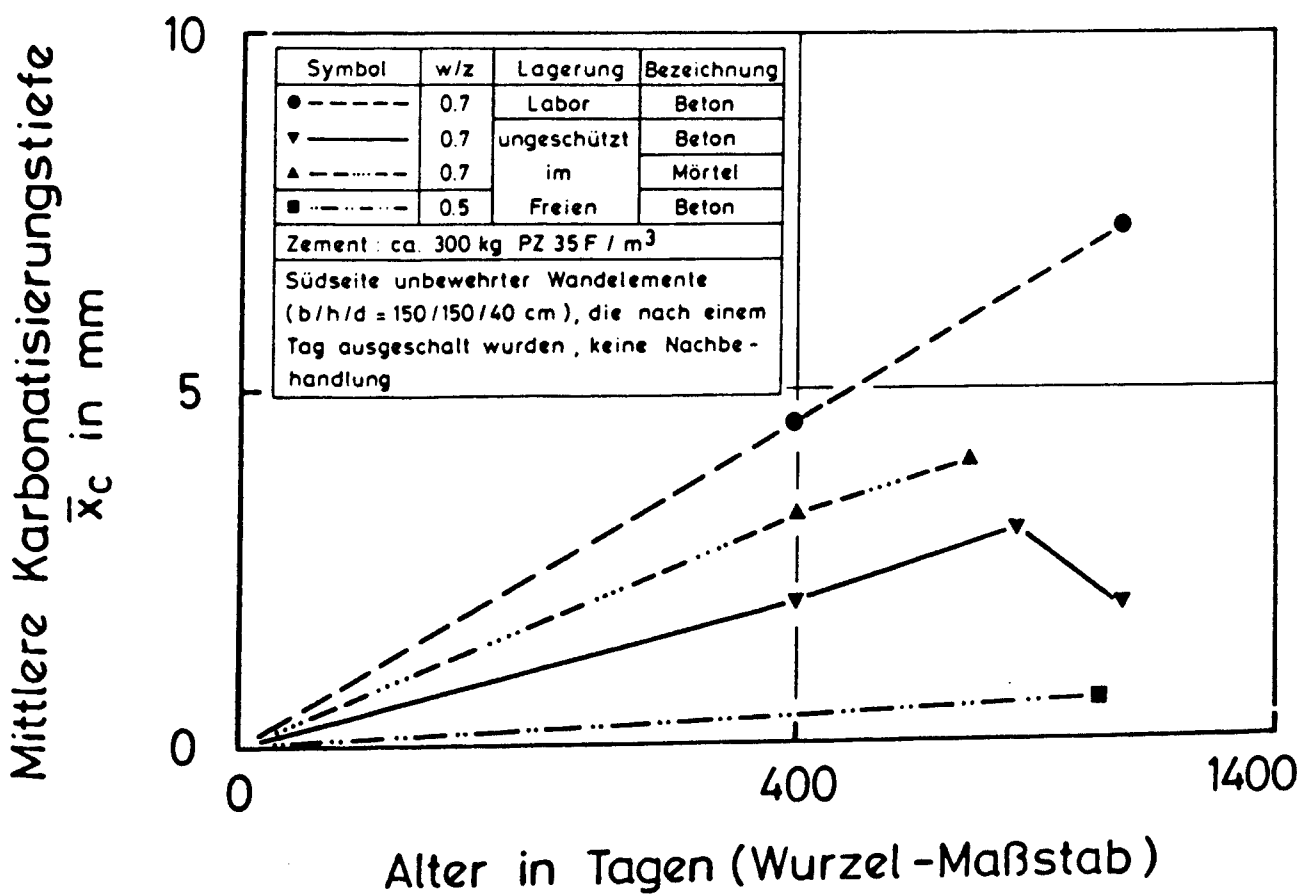
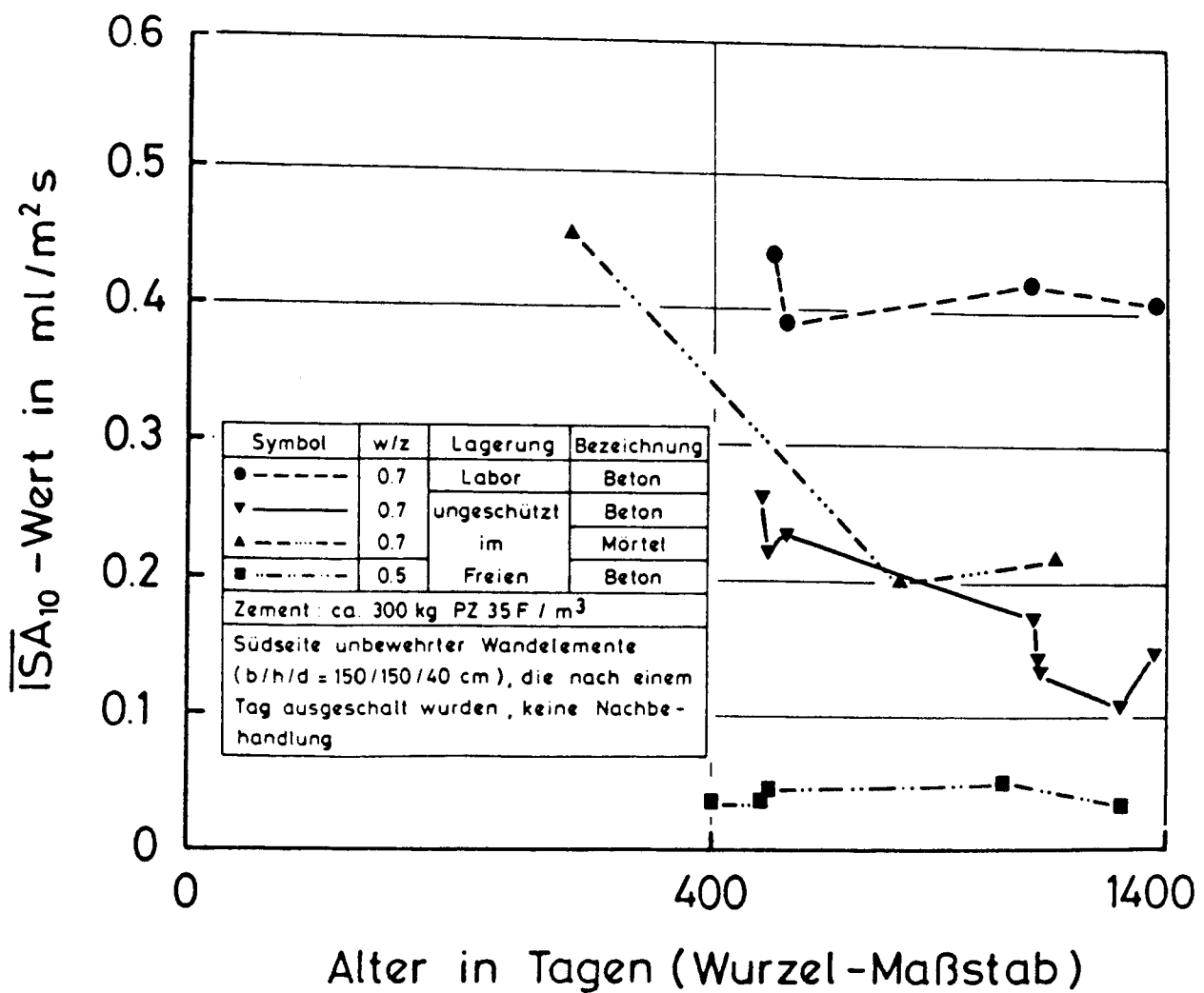


Bild D137: Einfluß der Karbonatisierung auf den ISA_{10} - Wert.

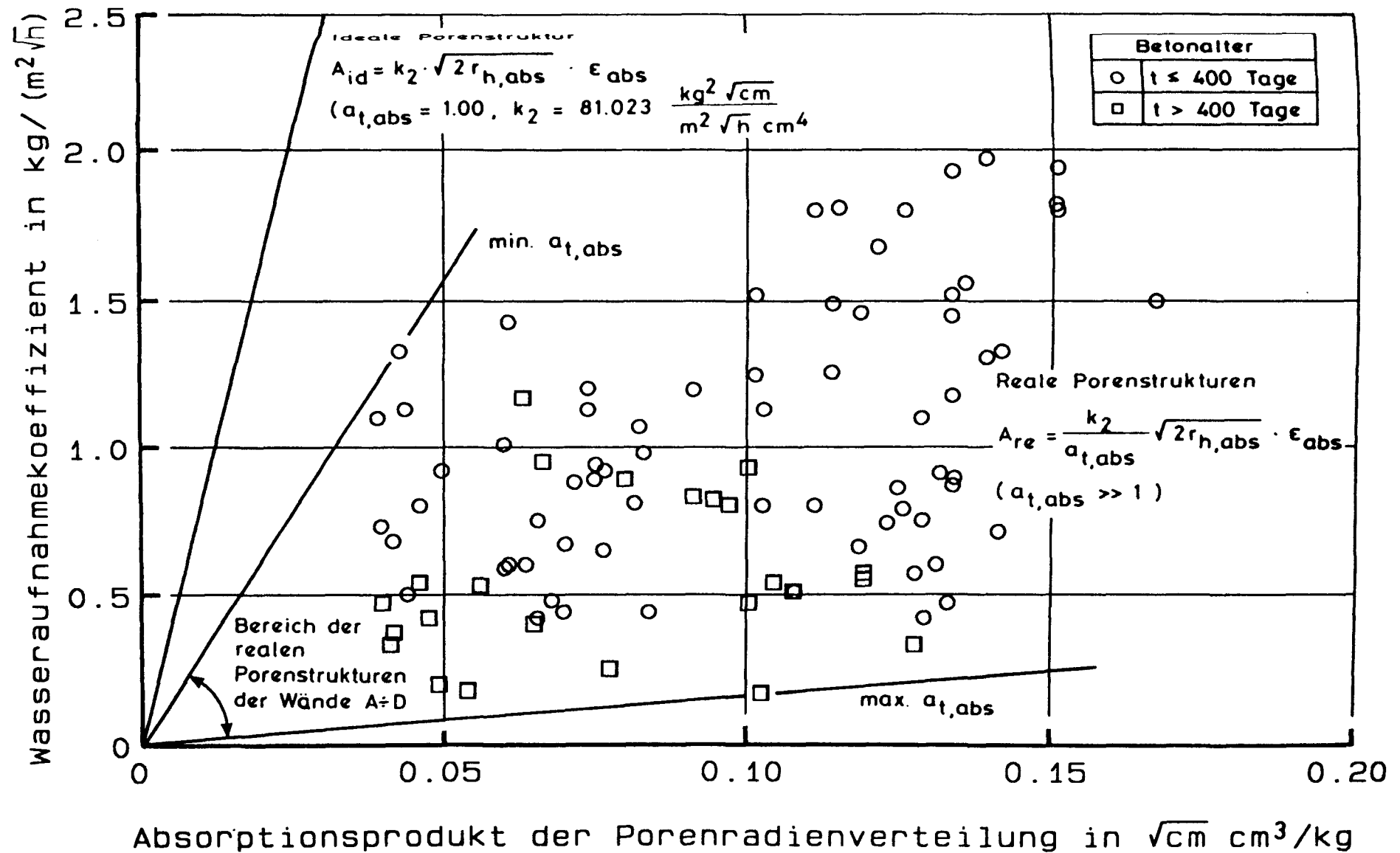


Bild D138

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung (Ergebnisse der Versuche an Proben der Wände A - D, alle Tiefen, getrennt nach dem Alter).

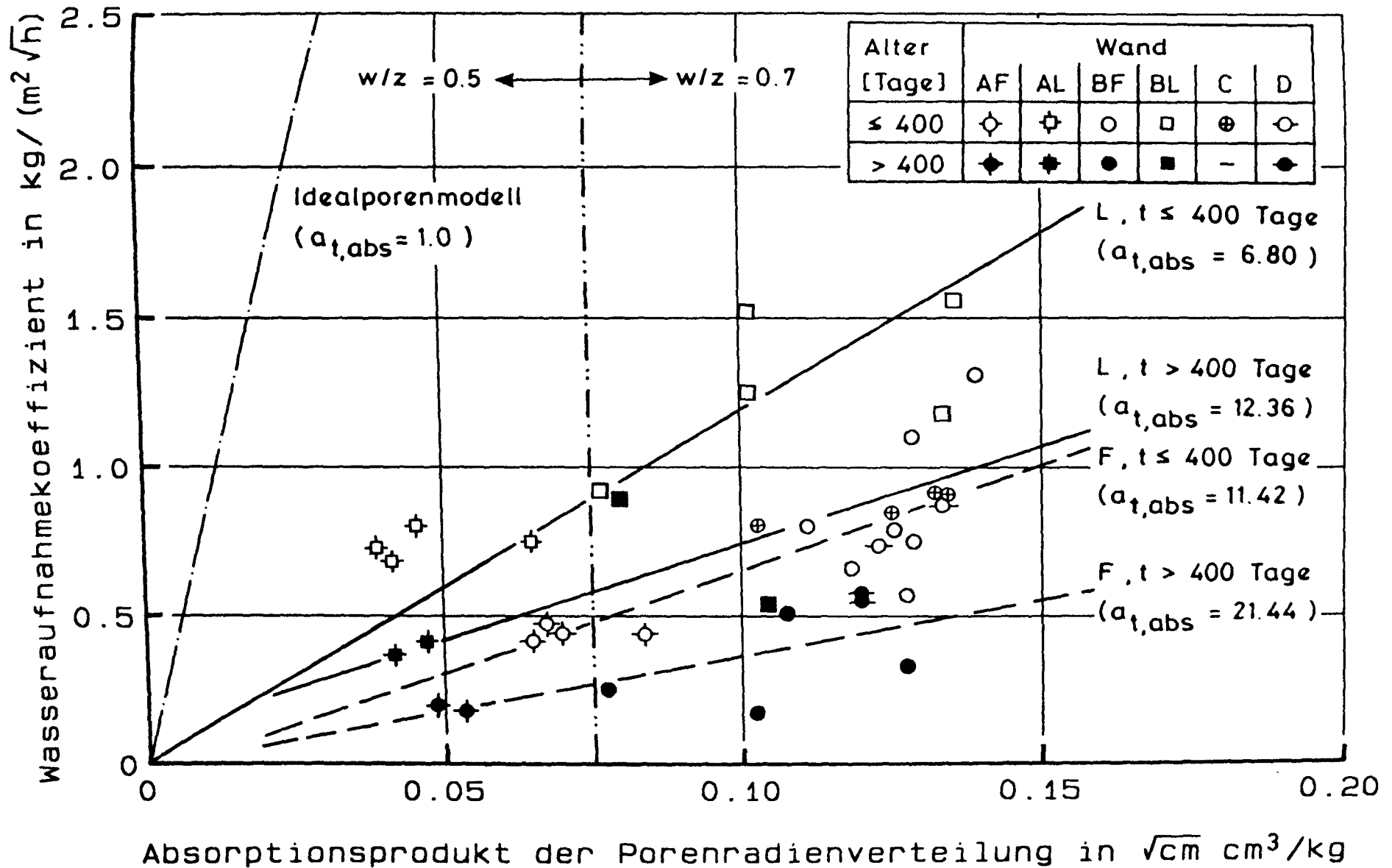


Bild D139

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung für die Proben des oberflächennahen Betons (0 - 20 mm) der Wände A - D getrennt nach Alter und Lagerungsbedingungen.

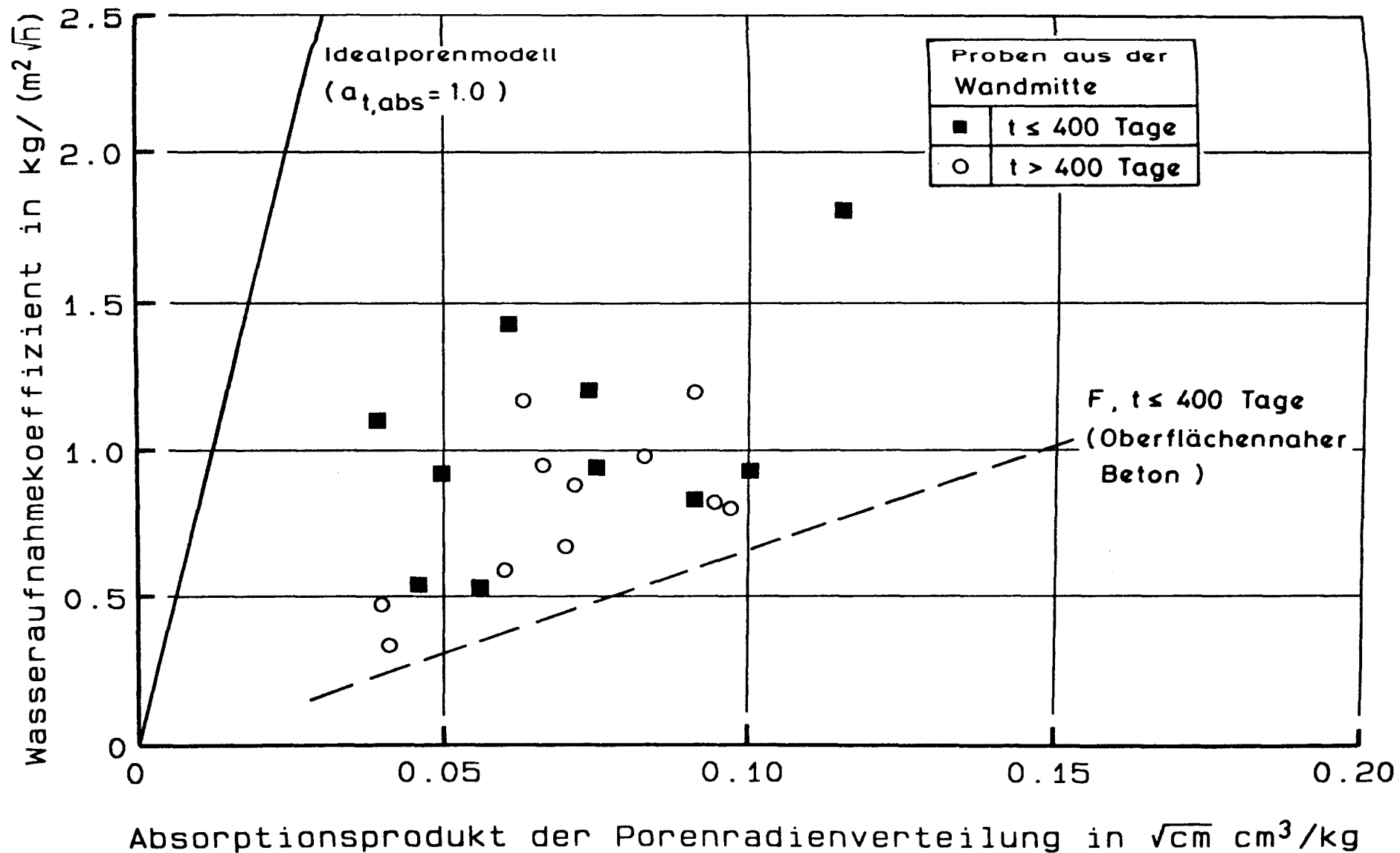


Bild D140

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung für die Proben aus der Wandmitte der Wände A - D getrennt nach dem Alter.

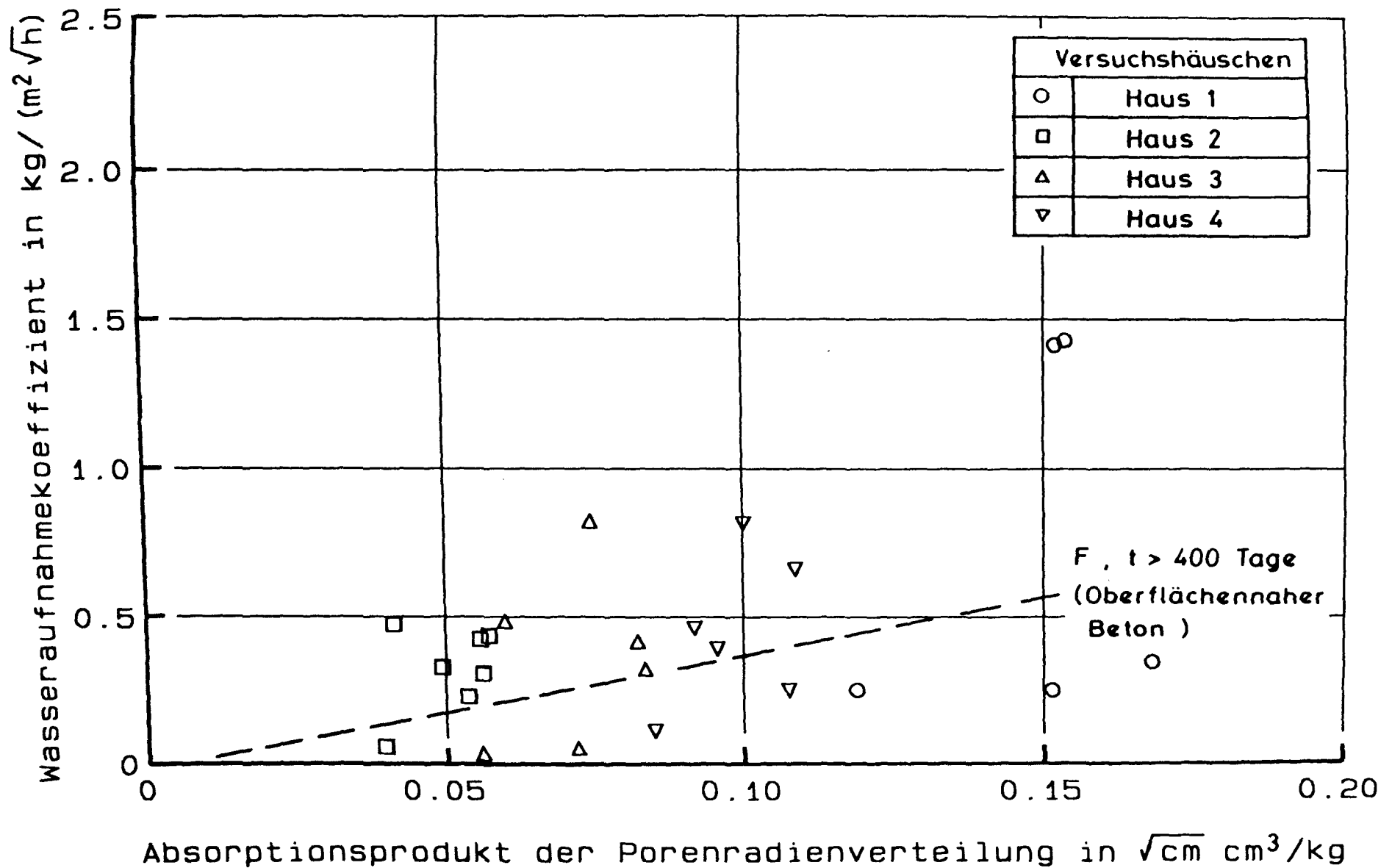


Bild D141

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung für die Proben der Versuchshäuser aus Beckum (ohne Trennung nach dem Entnahmeort der Proben).

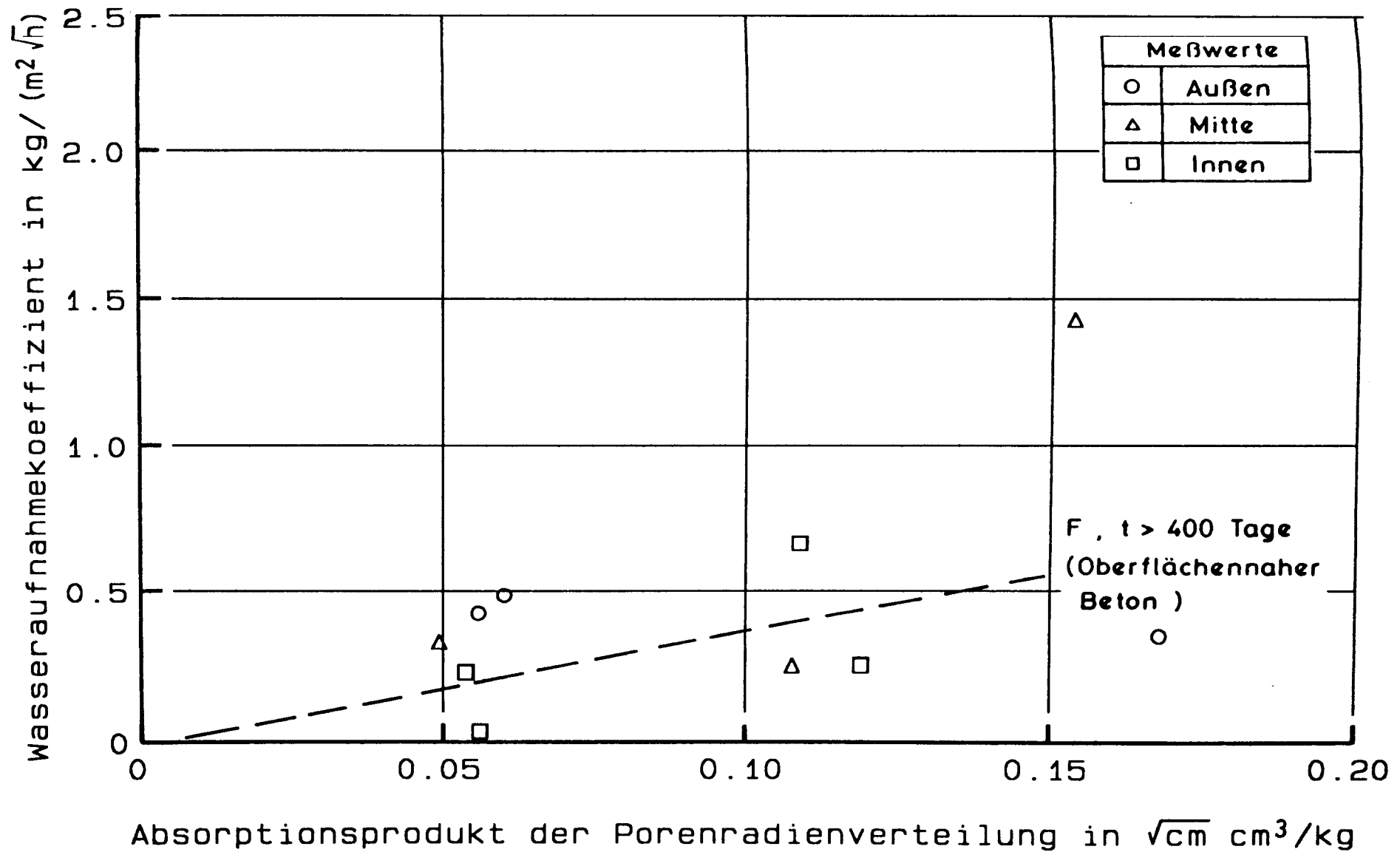


Bild D142

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung für die Proben der Versuchshäuser aus Beckum (getrennt nach dem Entnahmeort der Proben).

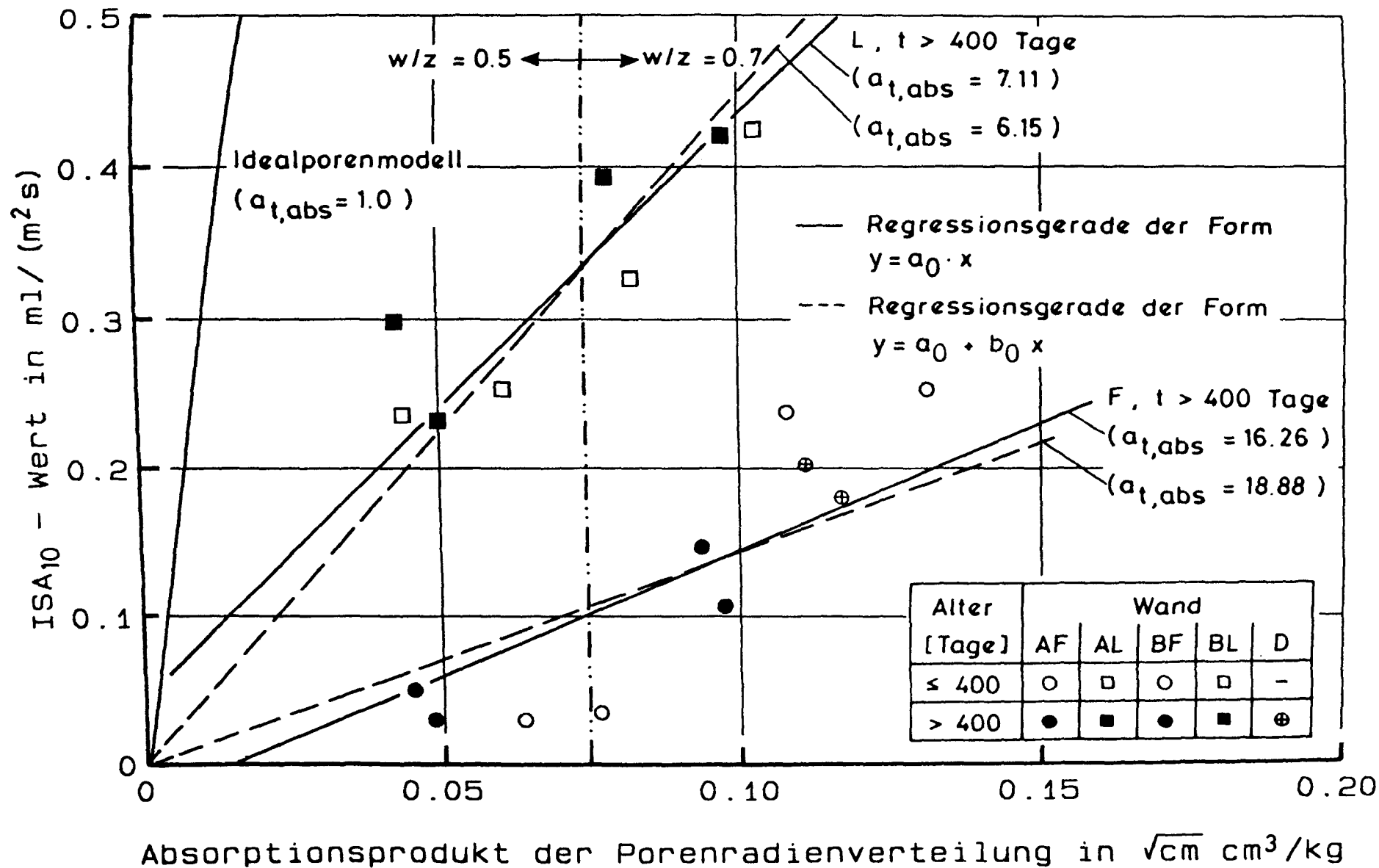


Bild D143

Korrelation des ISA_{10} - Wertes mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung (Ergebnisse der Versuche an den Wänden A - D (0 - 10 mm), getrennt nach den Lagerungsbedingungen).

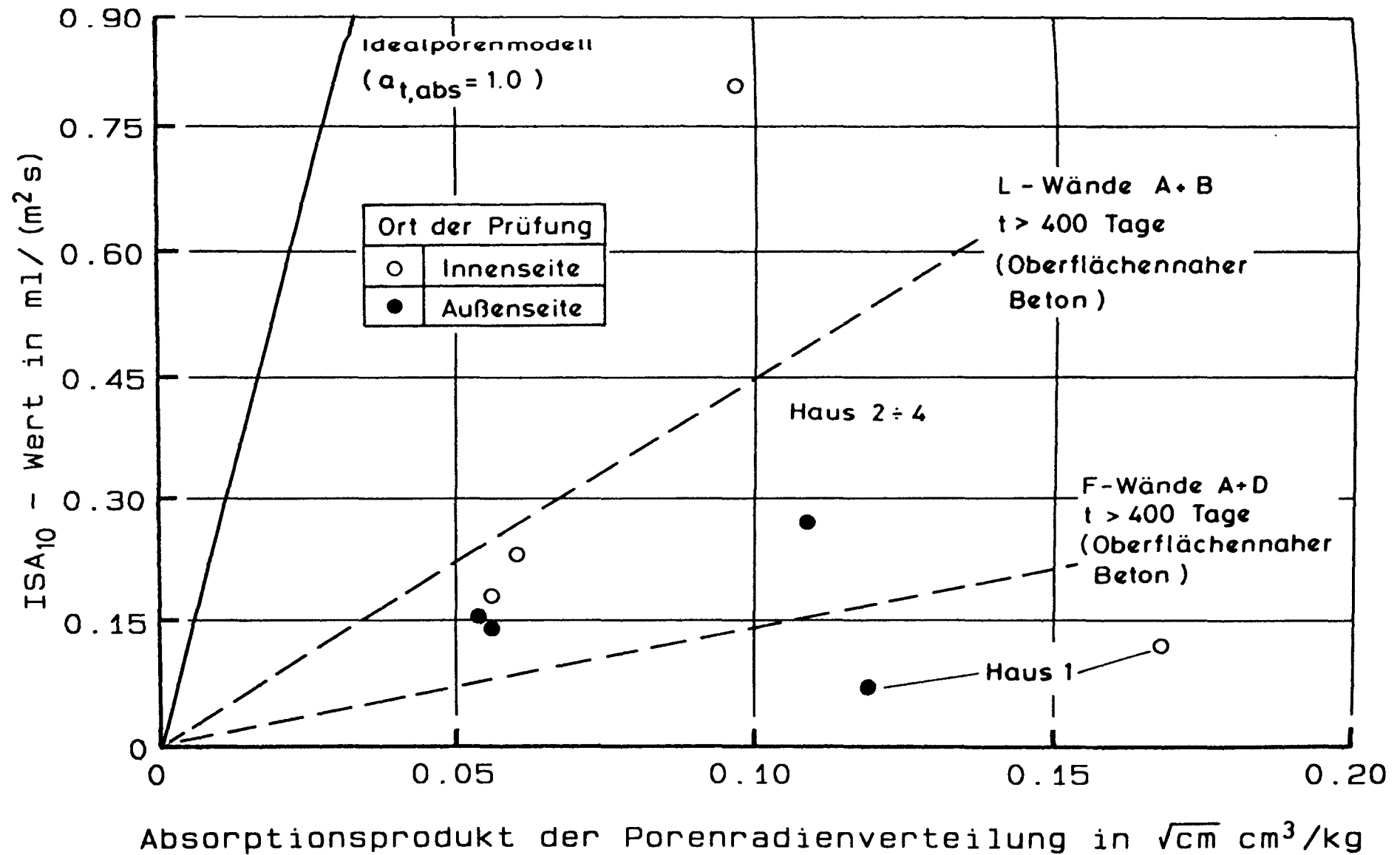


Bild D144

Korrelation des ISA_{10} - Wertes mit dem Absorptionsprodukt der Porenradienverteilung für die Ergebnisse der Versuche an den Versuchshäusern in Beckum.

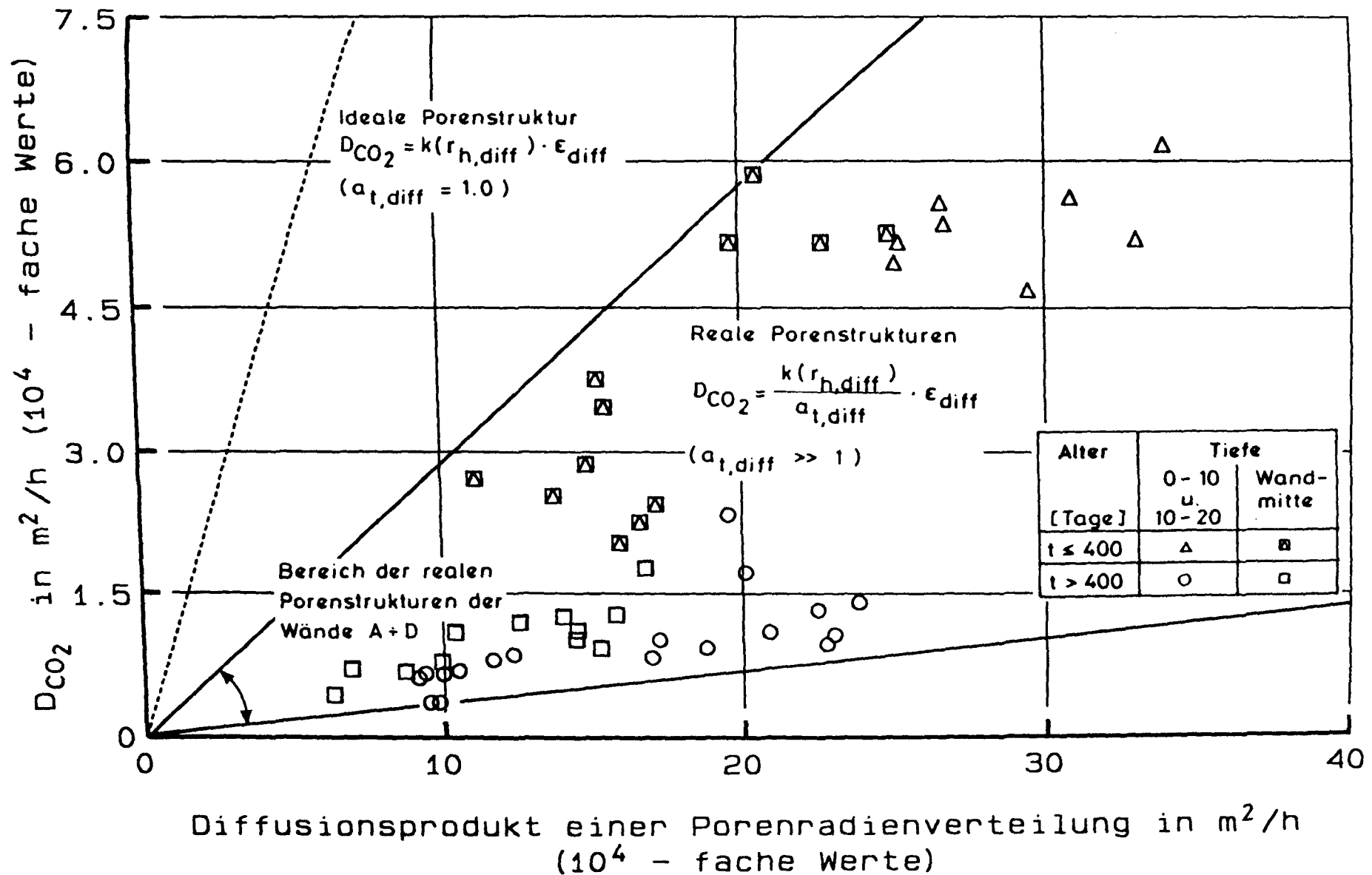


Bild D145

Korrelation des CO_2 - Diffusionskoeffizienten mit dem Diffusionsprodukt der Porenradienverteilung (Ergebnisse an Proben der Wände A - D getrennt nach dem Alter und der Wandtiefe).

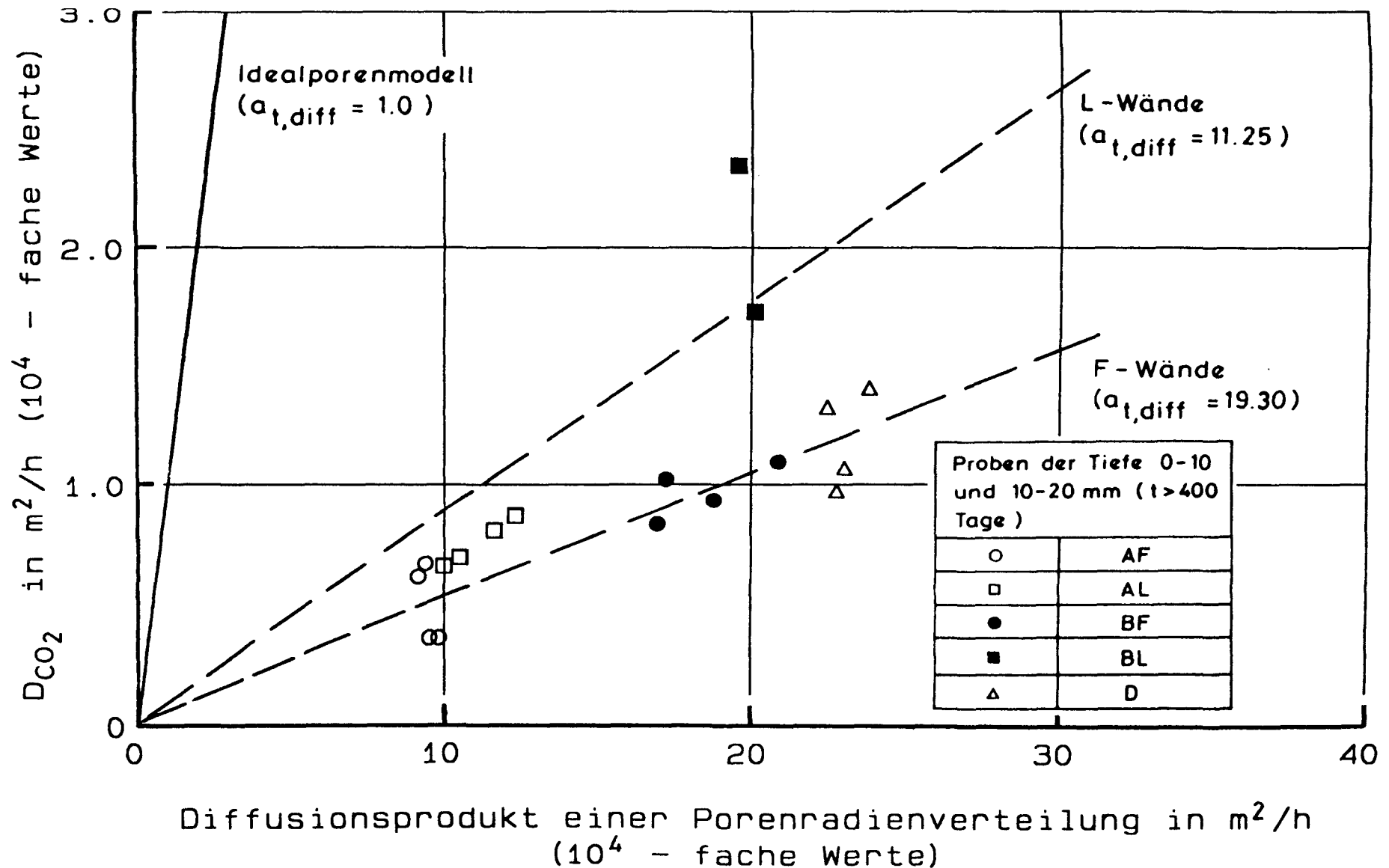


Bild D146

Korrelation des CO_2 - Diffusionskoeffizienten mit dem Diffusionsprodukt der Porenradienverteilung (Ergebnisse an Proben der Wände A - D getrennt nach den Lagerungsbedingungen für die Entnahmetiefen 0 - 10 und 10 - 20 mm).

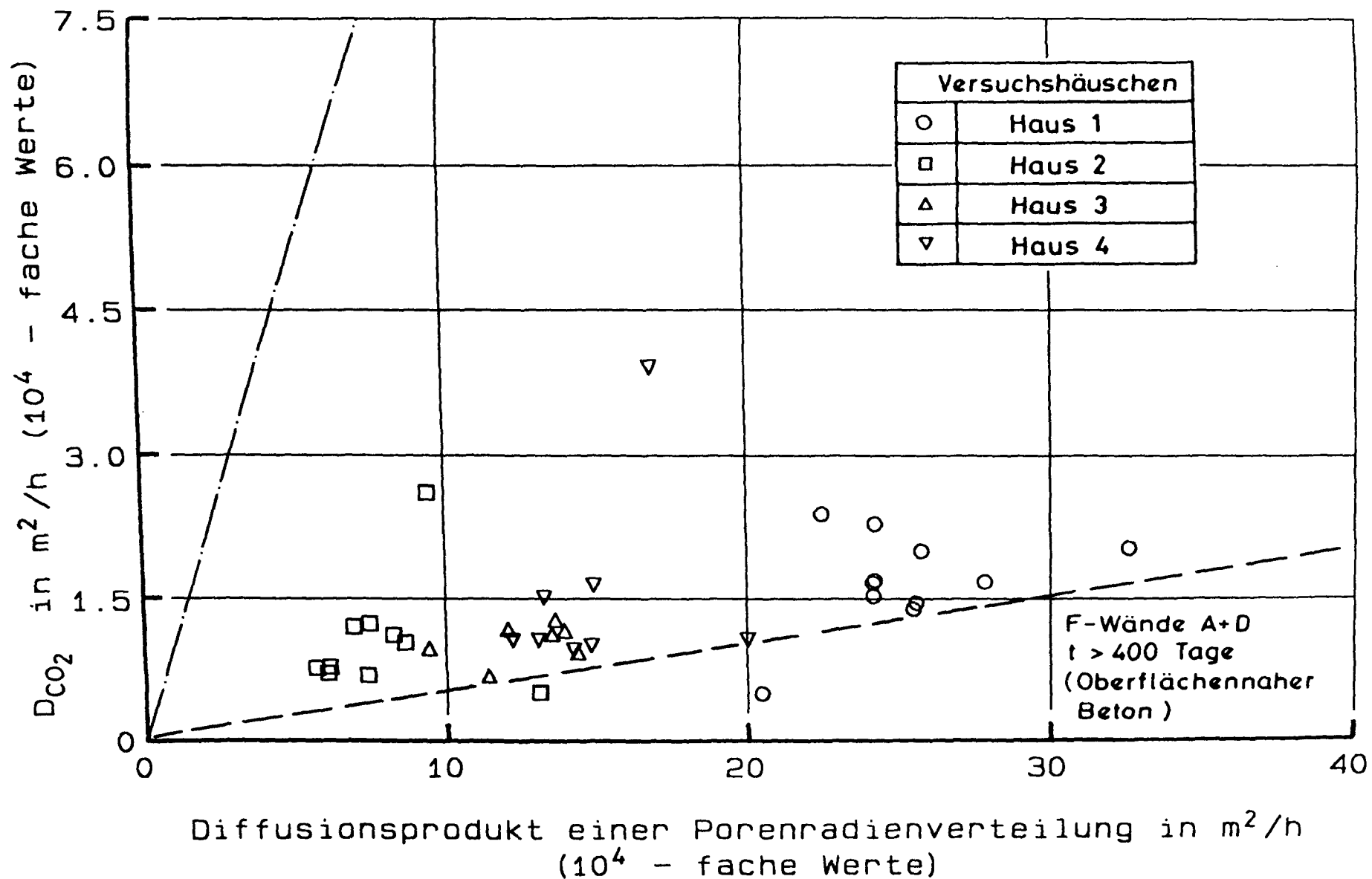


Bild D147

Korrelation des CO_2 - Diffusionskoeffizienten mit dem Diffusionsprodukt der Porenradienverteilung (Ergebnisse an Proben der Versuchshäuser 1 - 4 aus Beckum, ohne Trennung nach der untersuchten Wandtiefe).

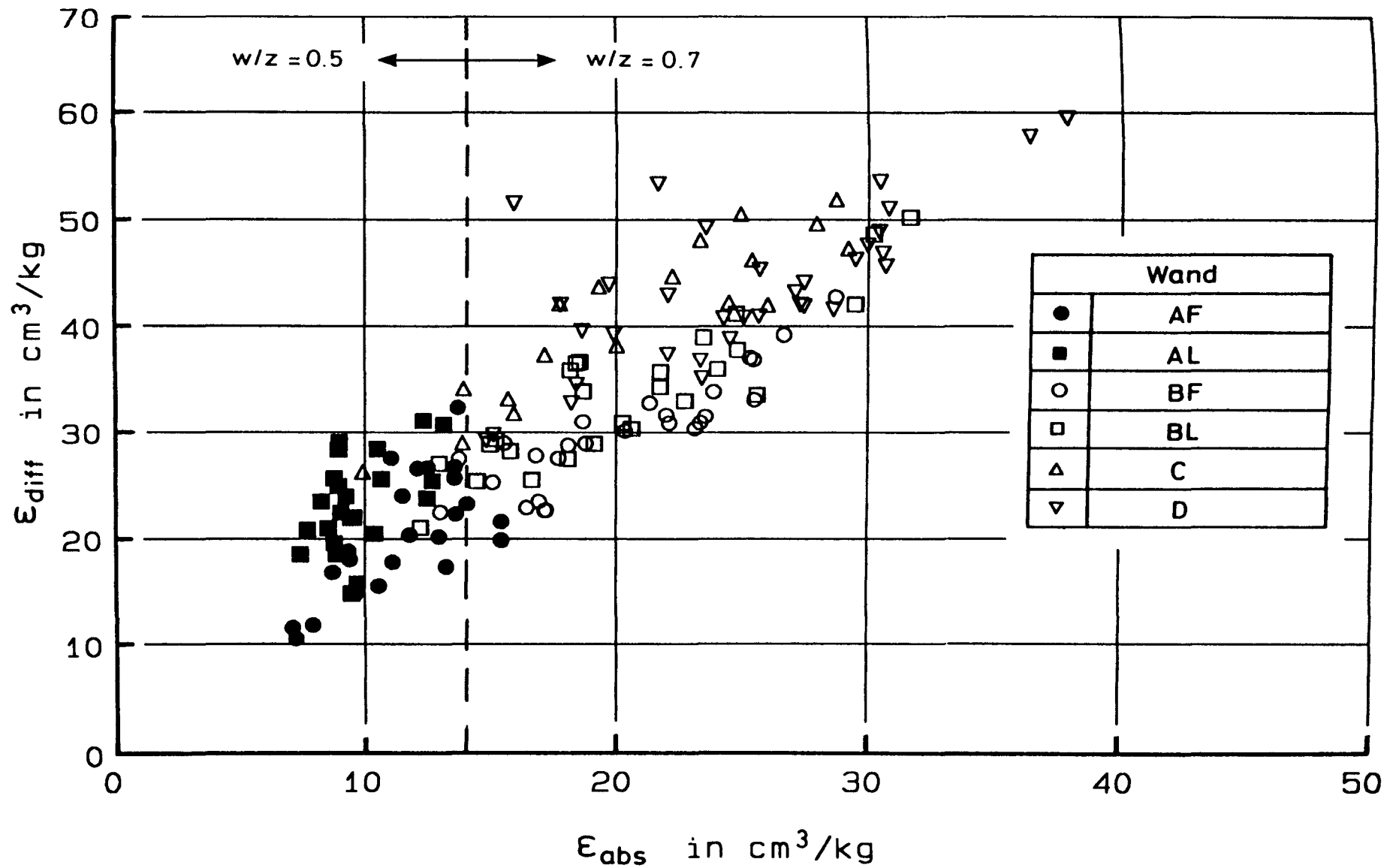


Bild D148

Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Proben aller Tiefen und Alter der Wände A - D.

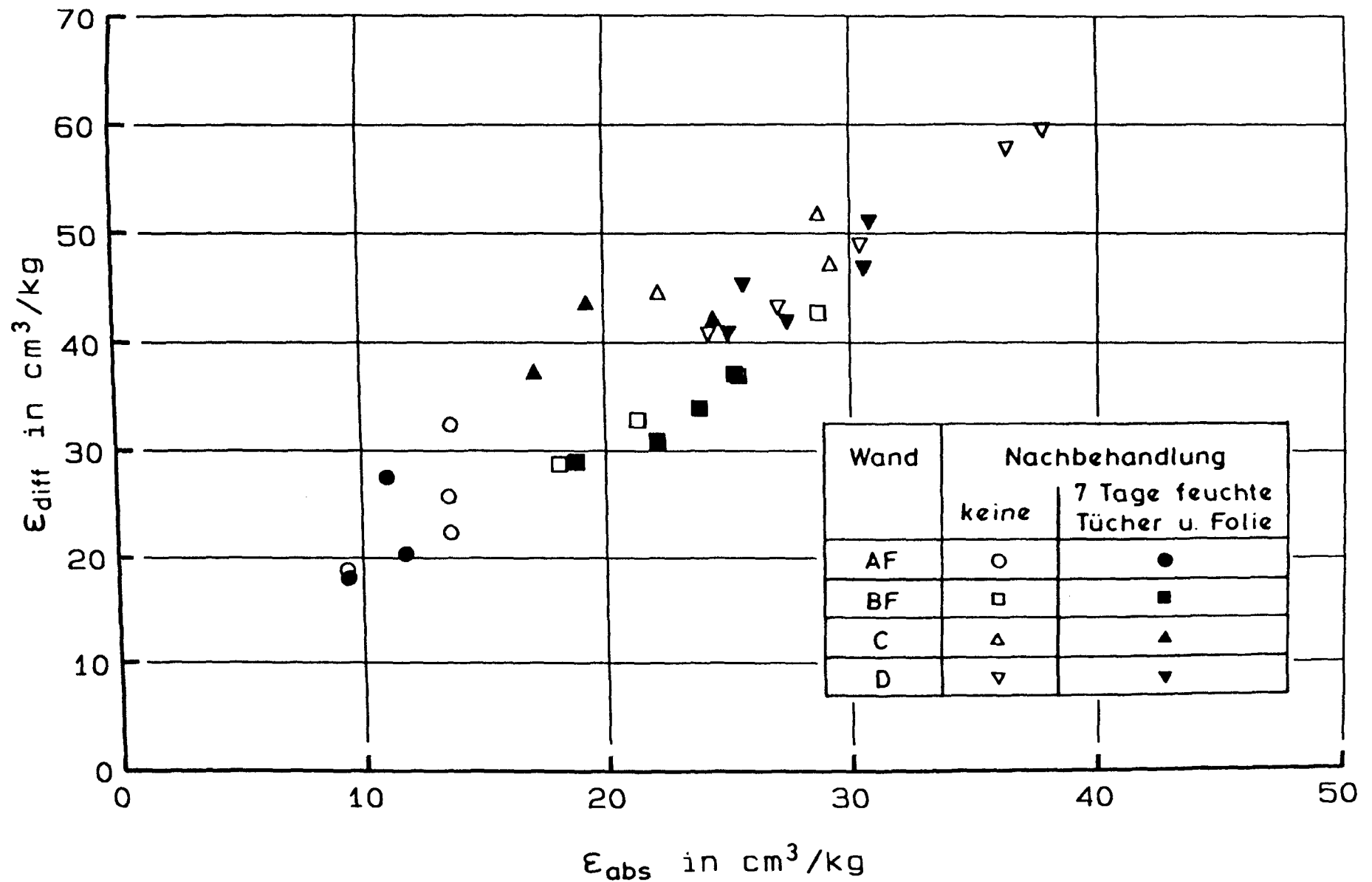


Bild D149

Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Proben der Tiefe 0 - 10 mm aller Alter der im Freien aufgestellten Wände A - D.

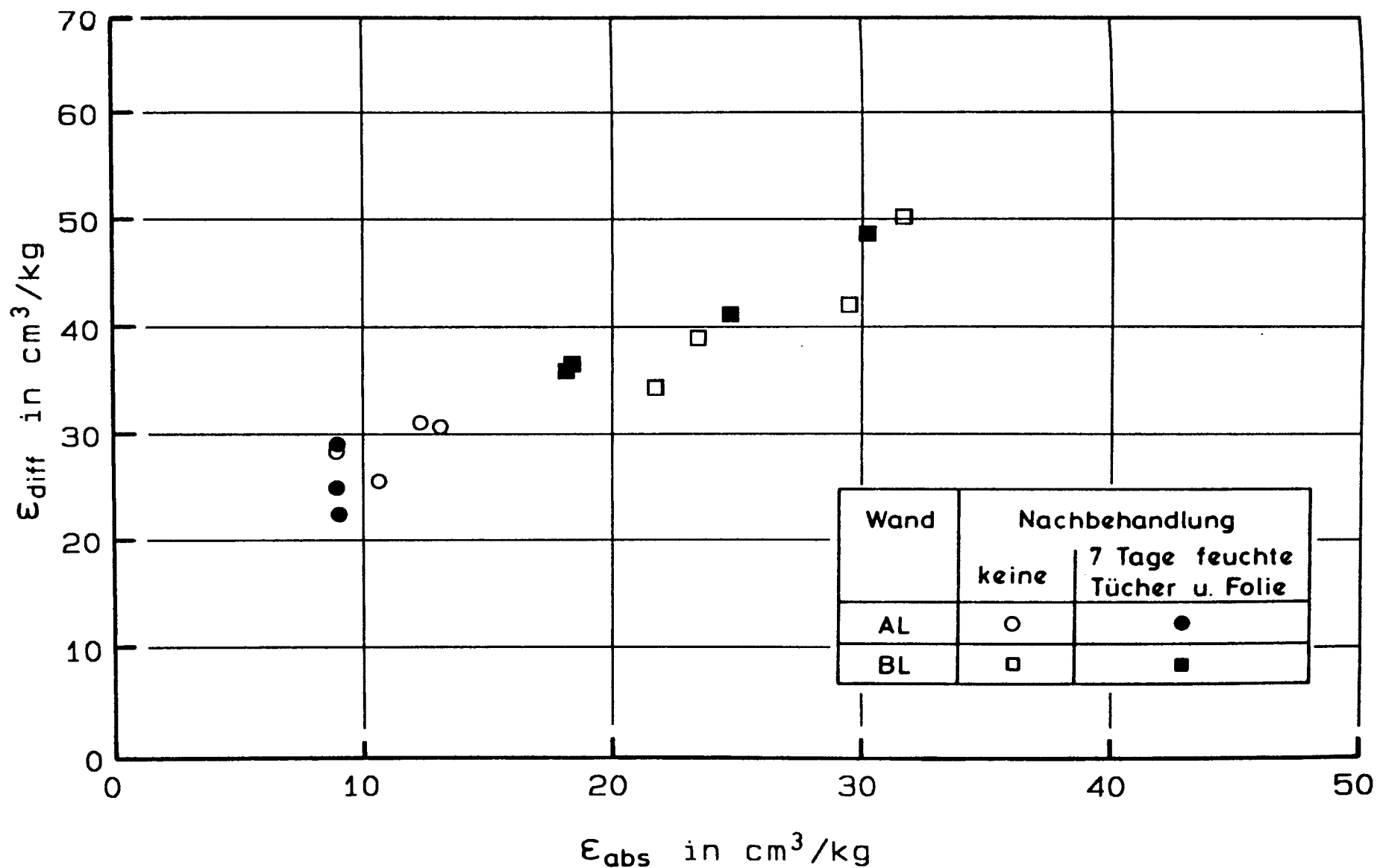


Bild D150

Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} der Proben der Tiefe 0 - 10 mm aller Alter der im Labor aufgestellten Wände A und B.

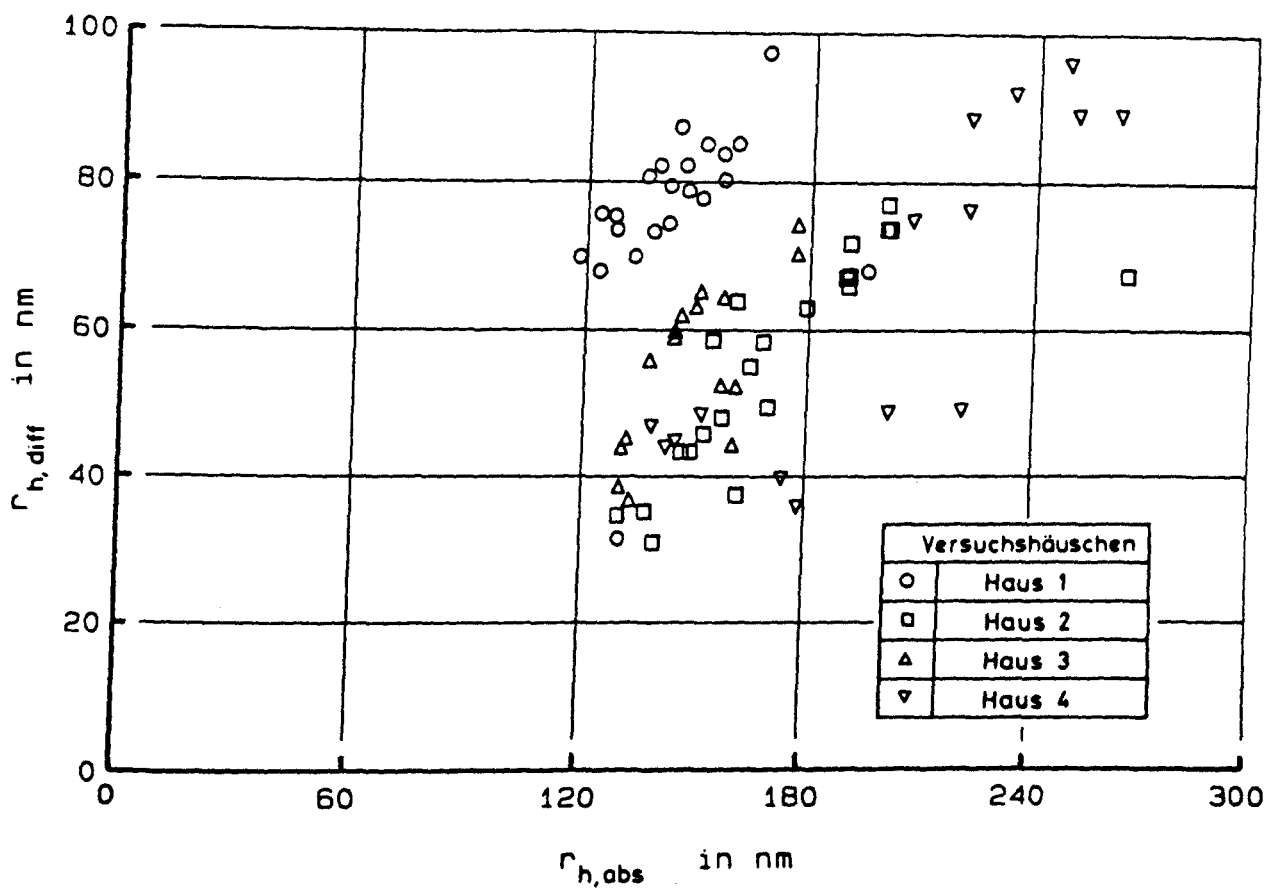
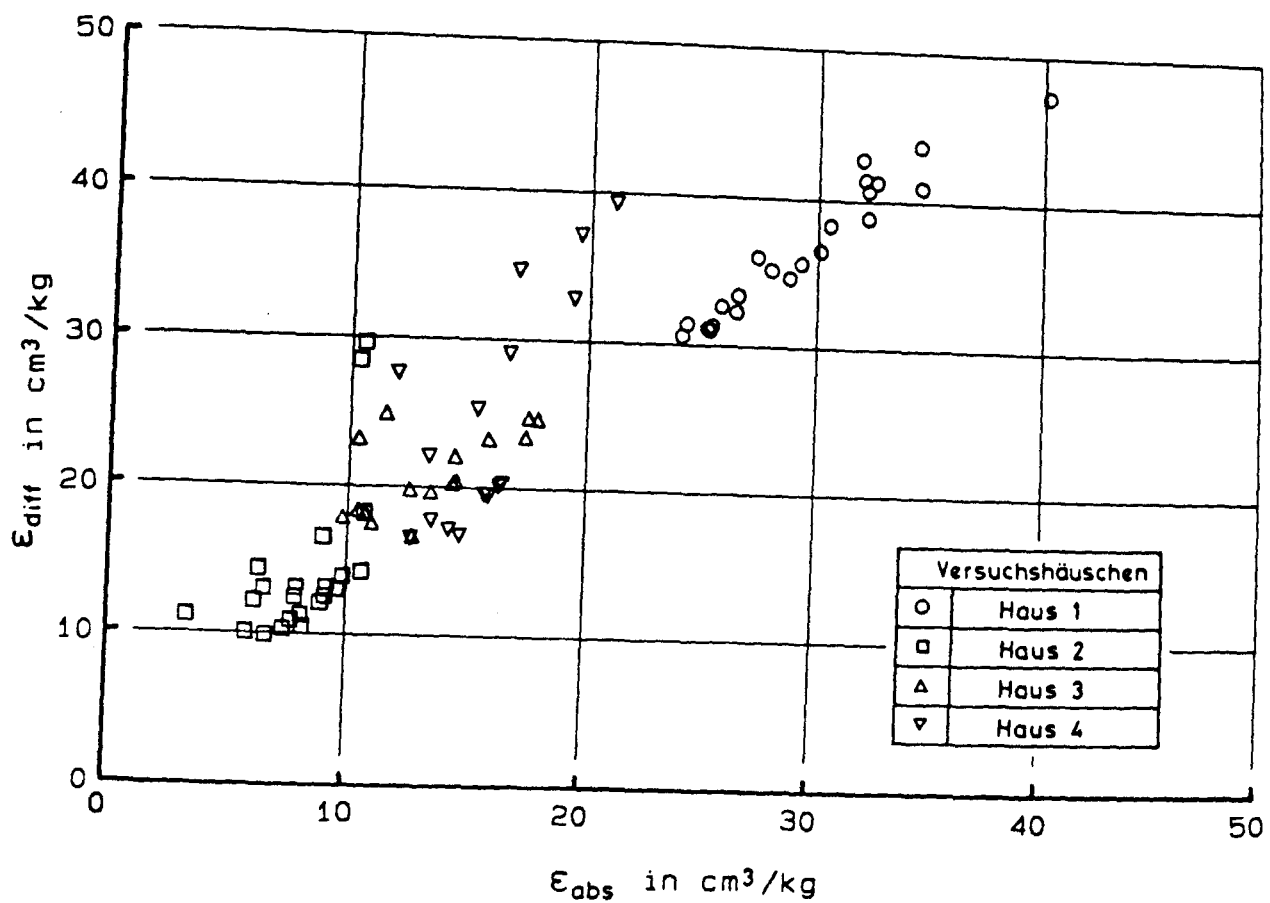


Bild D151

Korrelation der transportrelevanten Teilporositäten ϵ_{diff} und ϵ_{abs} (obere Bildhälfte) und der transportrelevanten hydraulischen Porenradien $r_{h,diff}$ und $r_{h,abs}$ (untere Bildhälfte) der Proben der Versuchshäuser 1 - 4 aus Beckum (alle Wandtiefen).

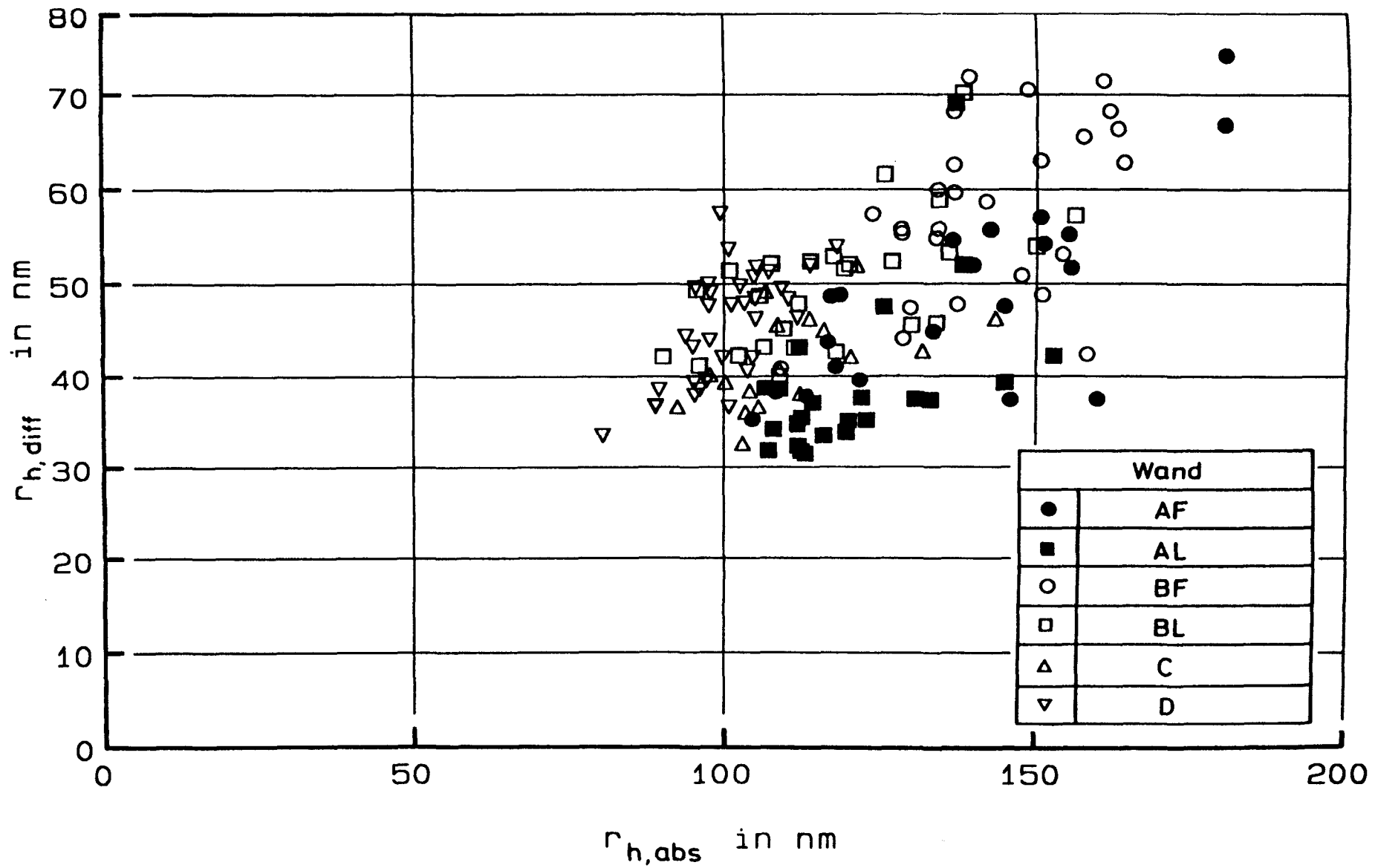


Bild D152

Korrelation der transportrelevanten hydraulischen Porenradien $r_{h,diff}$ und $r_{h,abs}$ der Proben aller Tiefen und Alter der Wände A - D.

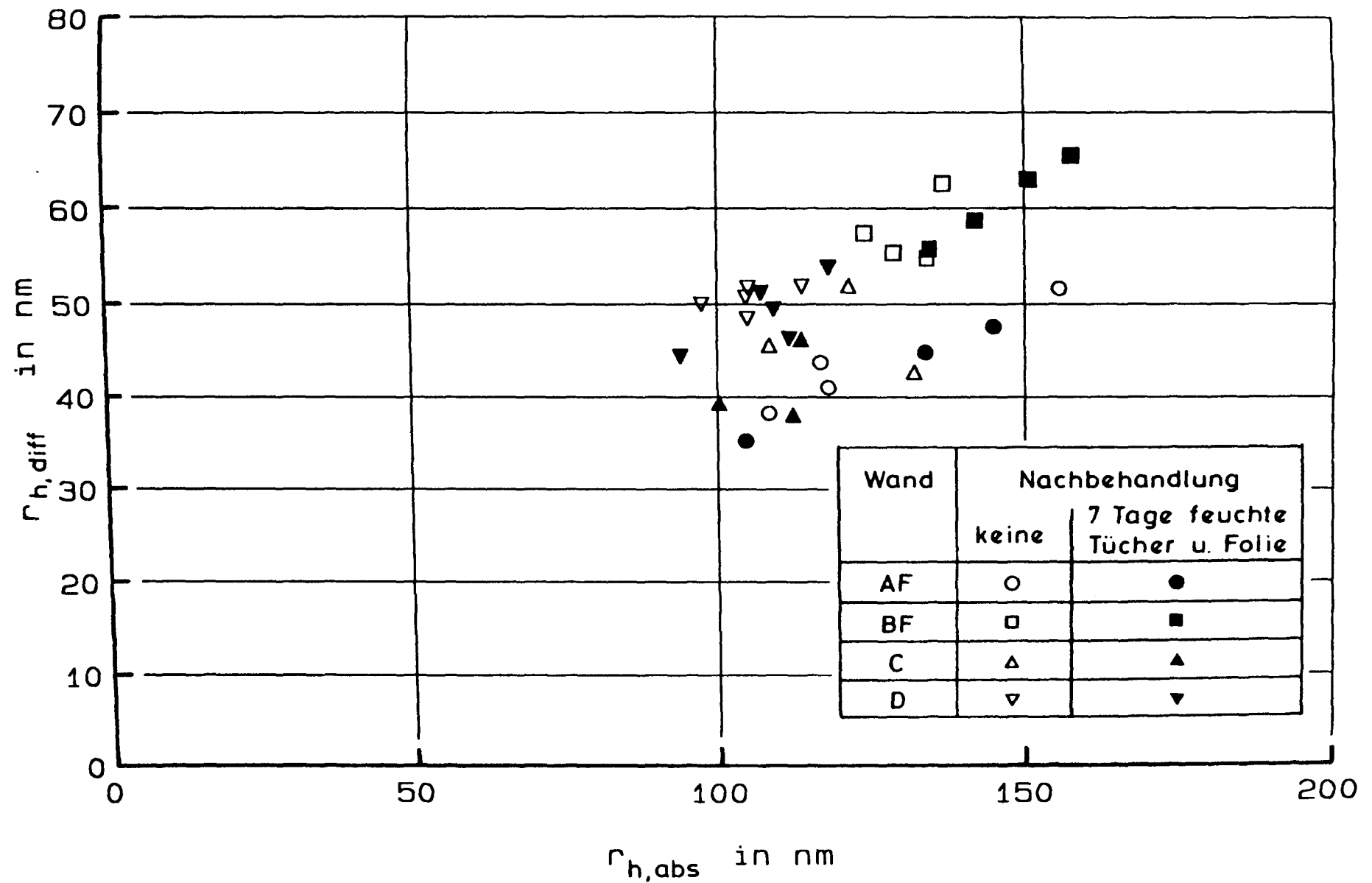


Bild D153

Korrelation der transportrelevanten hydraulischen Porenradien $r_{h,diff}$ und $r_{h,abs}$ der Proben der Tiefe 0 - 10 mm aller Alter der im Freien aufgestellten Wände A - D.

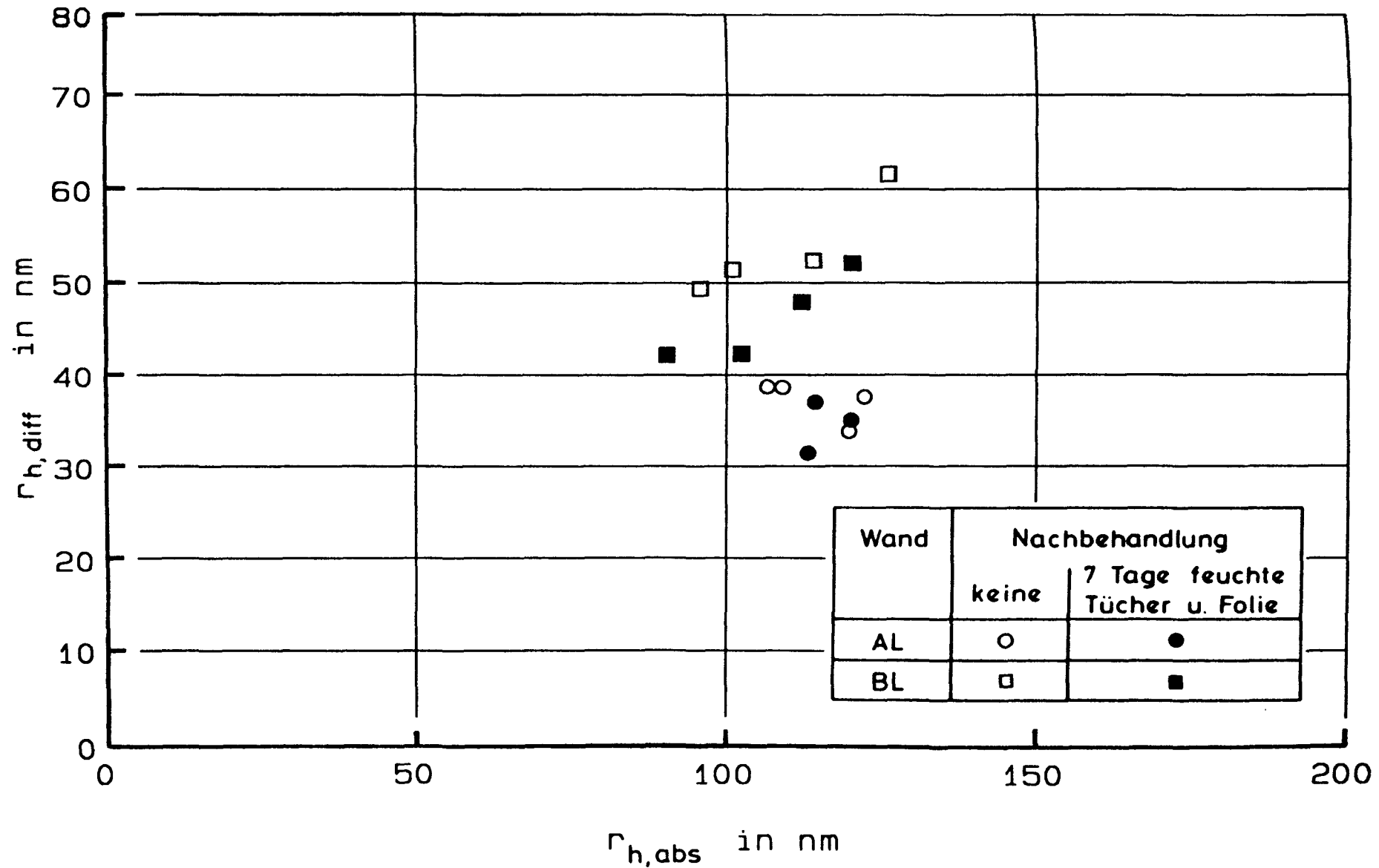


Bild D154

Korrelation der transportrelevanten hydraulischen Porenradien $r_{h,diff}$ und $r_{h,abs}$ der Proben der Tiefe 0 - 10 mm aller Alter der im Labor aufgestellten Wände A und B.

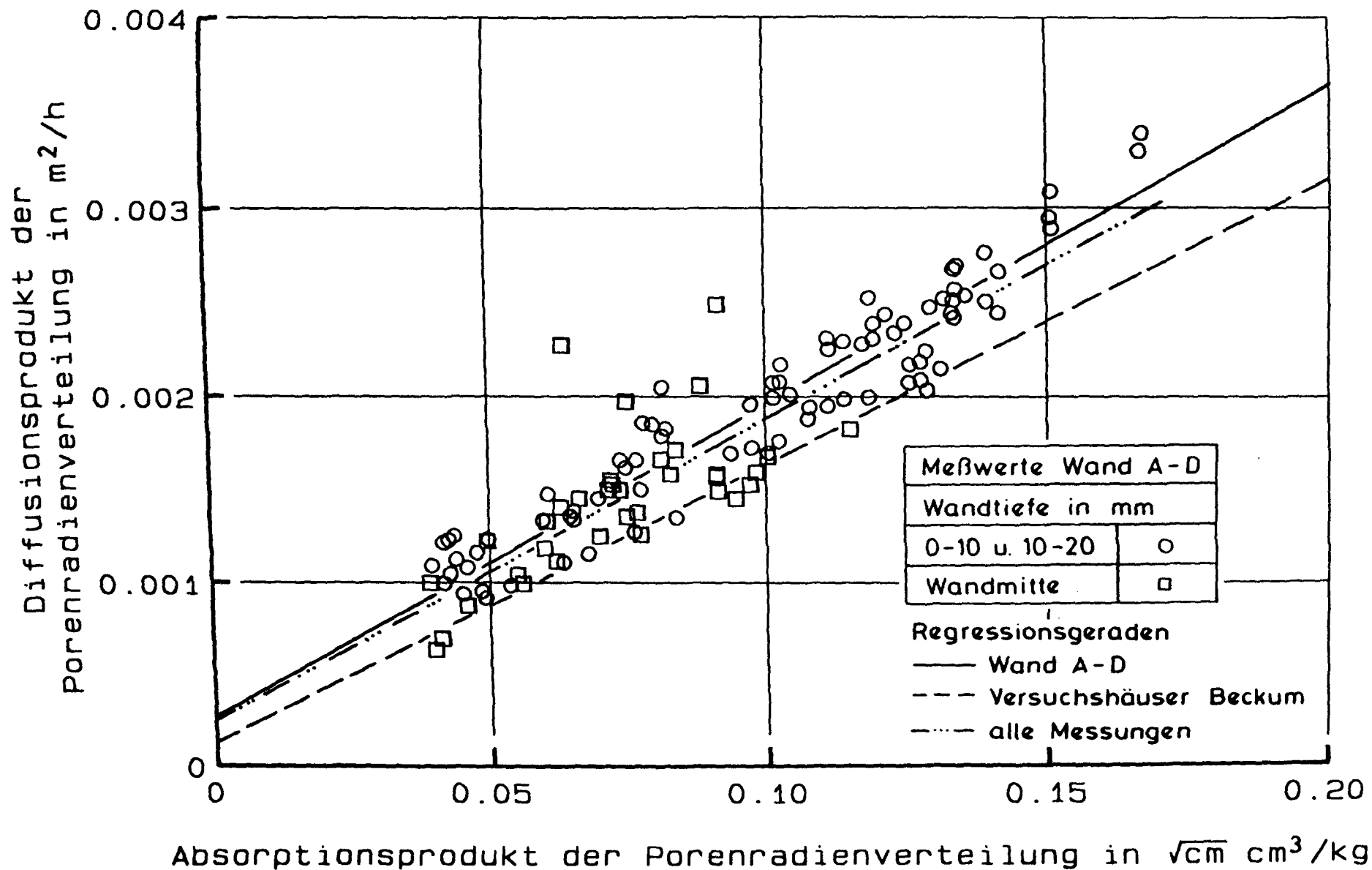


Bild D155

Korrelation des Diffusions- und Absorptionsproduktes der Porenradienverteilung für die Proben der Wände A - D (alle Betonalter und Wandtiefen, einschließlich mehrerer Regressionsgeraden (siehe Legende)).

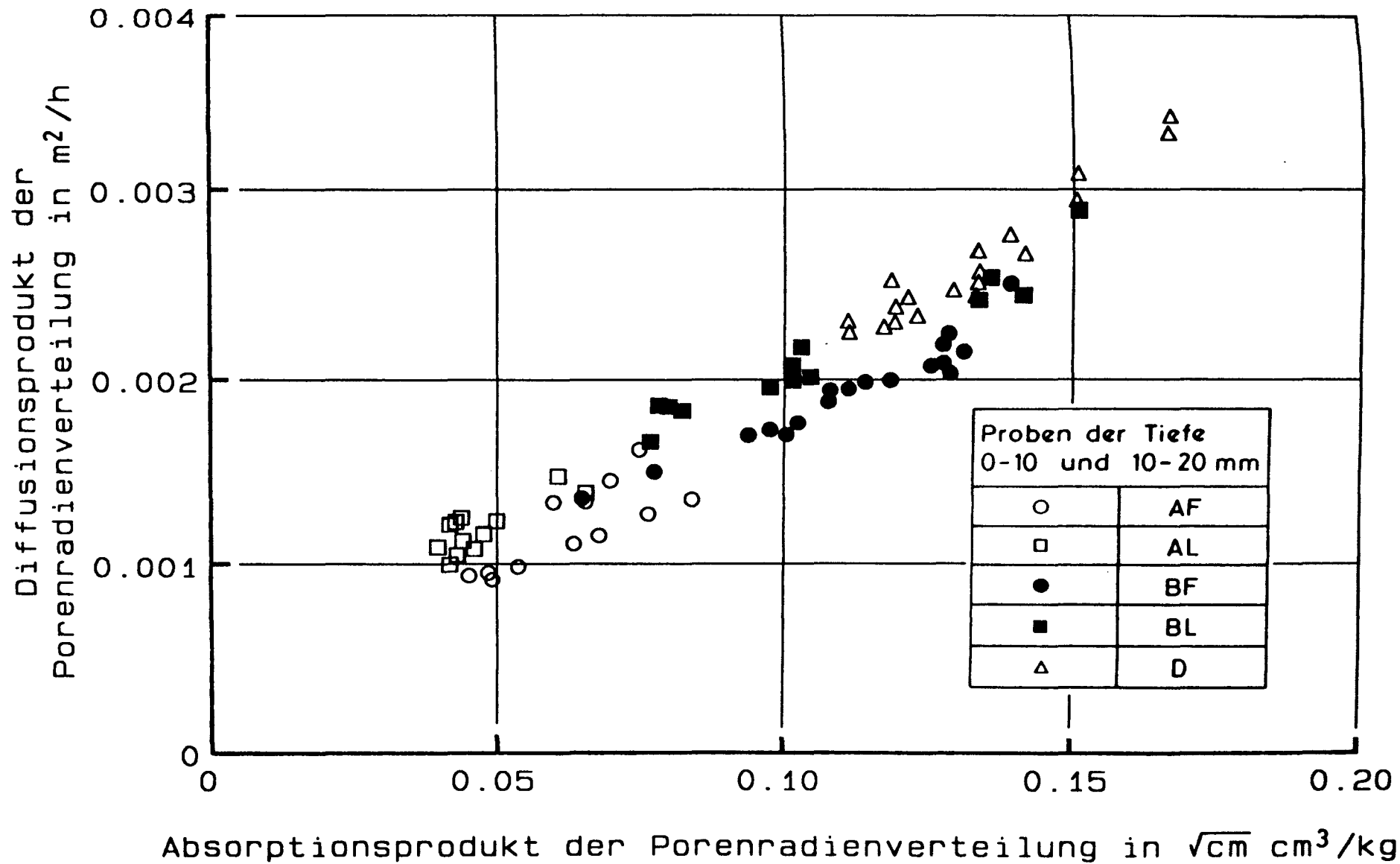


Bild D156

Korrelation des Diffusions- und Absorptionsproduktes der Porenradienverteilung für die Proben der Wände A - D (alle Betonalter) der Wandtiefen 0 -10 und 10 - 20 mm.

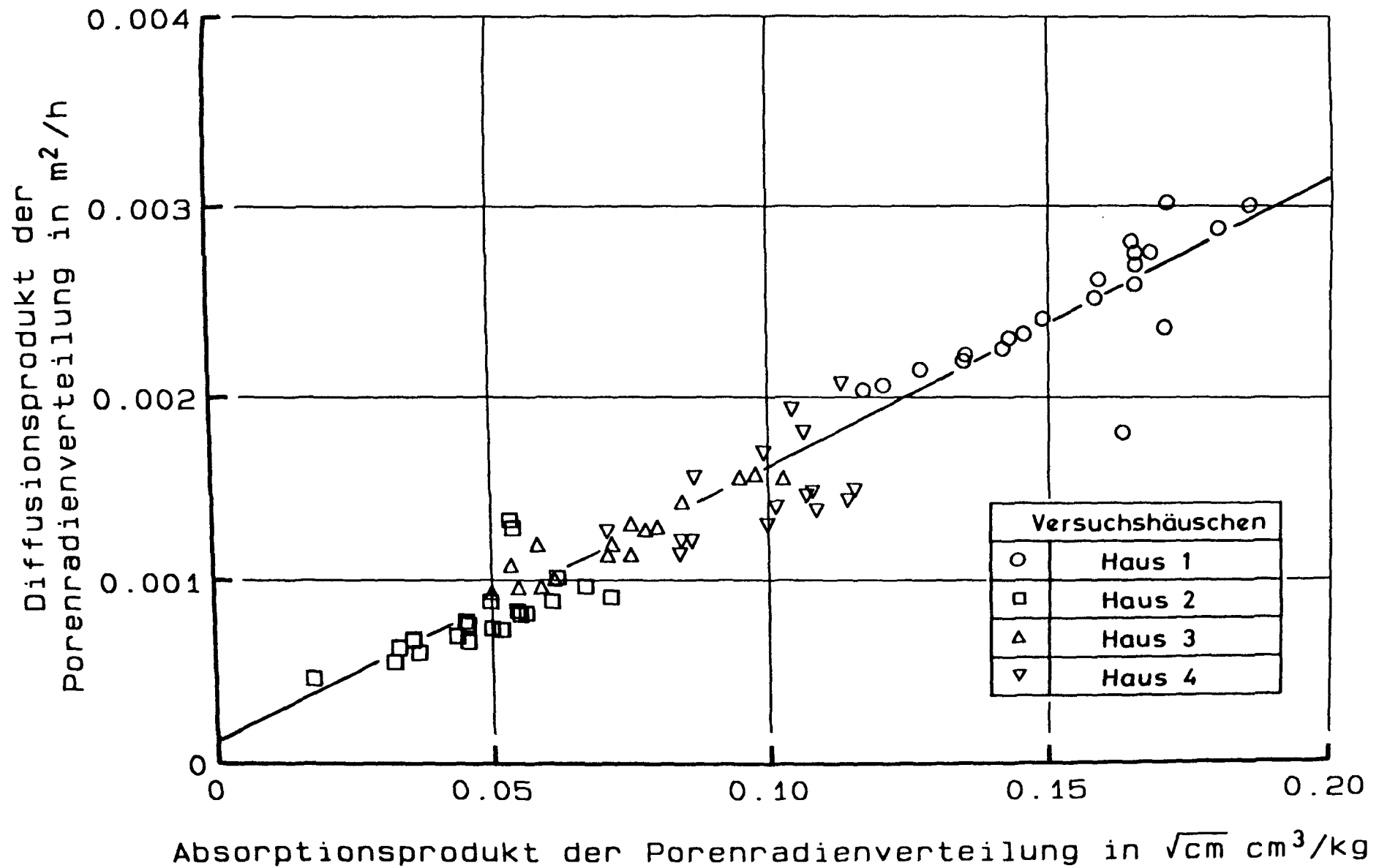


Bild D157

Korrelation des Diffusions- und Absorptionsproduktes der Porenradienverteilung für die Proben der Versuchshäuser aus Beckum (alle Wandtiefen).

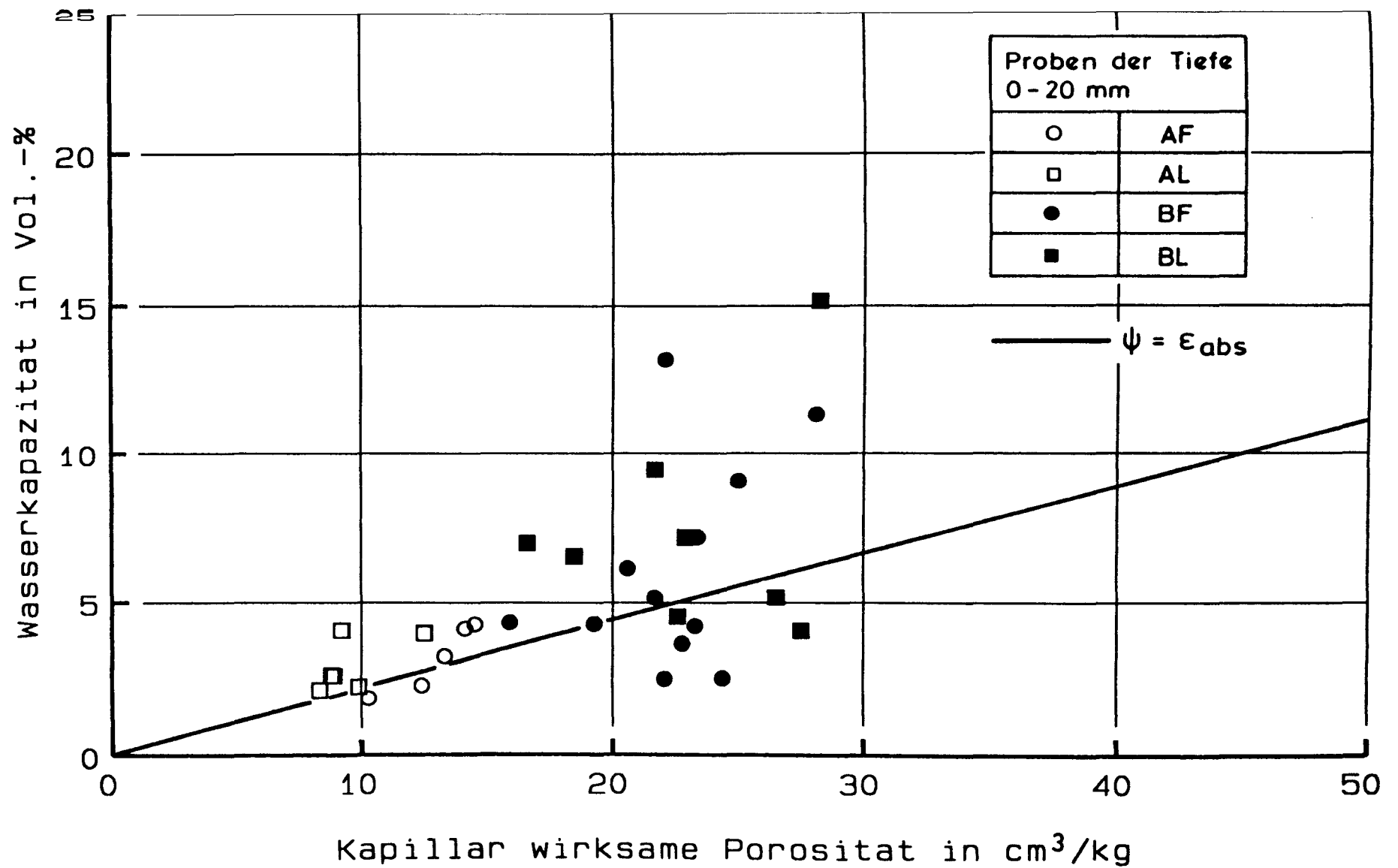


Bild D158

Korrelation der Wasserkapazität mit der kapillar wirksamen Porosität der oberflächennahen Proben der Wandpaare A und B.

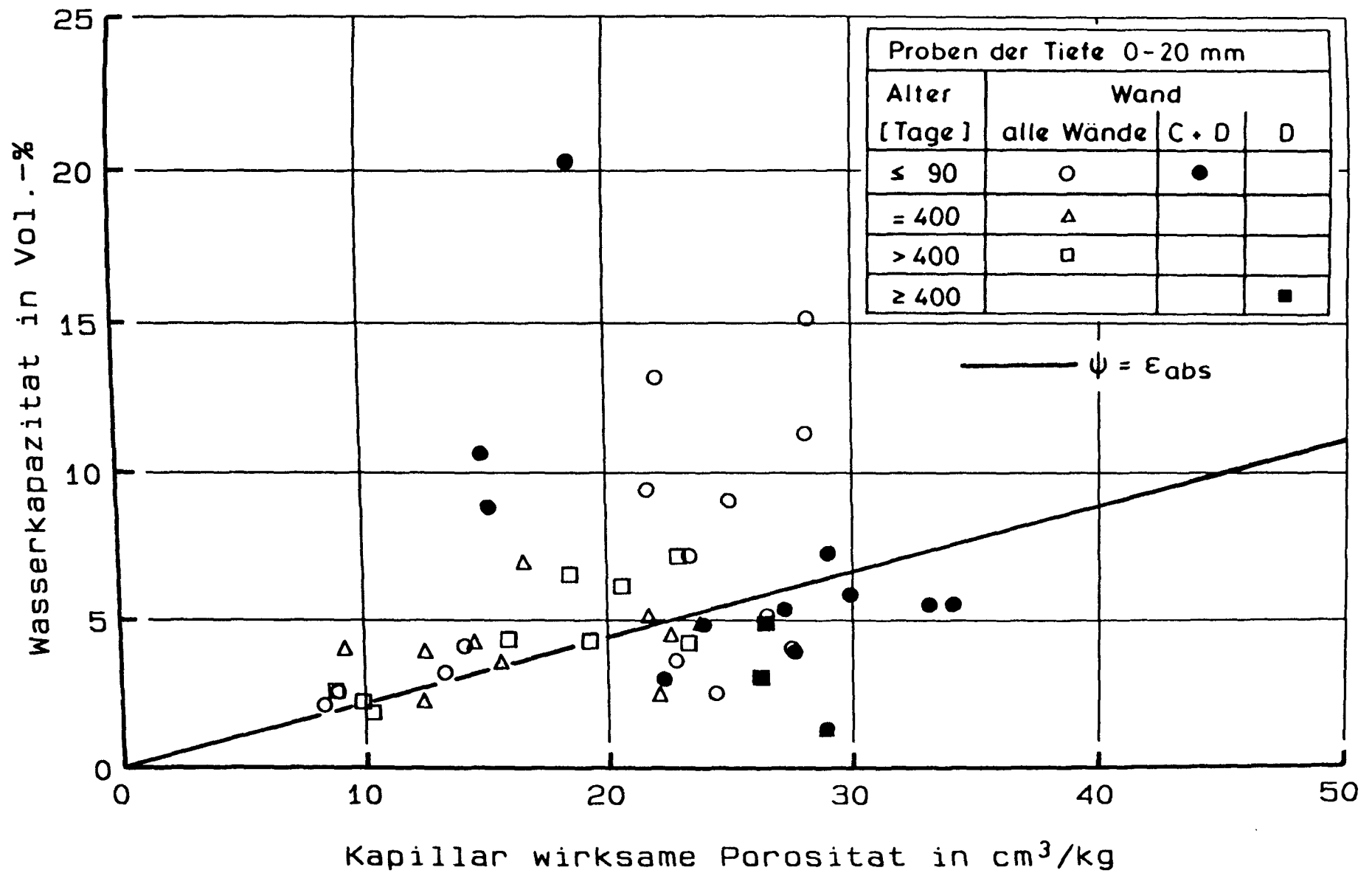


Bild D159

Korrelation der Wasserkapazität mit der kapillar wirksamen Porosität der oberflächennahen Proben der Wände A - D getrennt nach dem Betonalter.

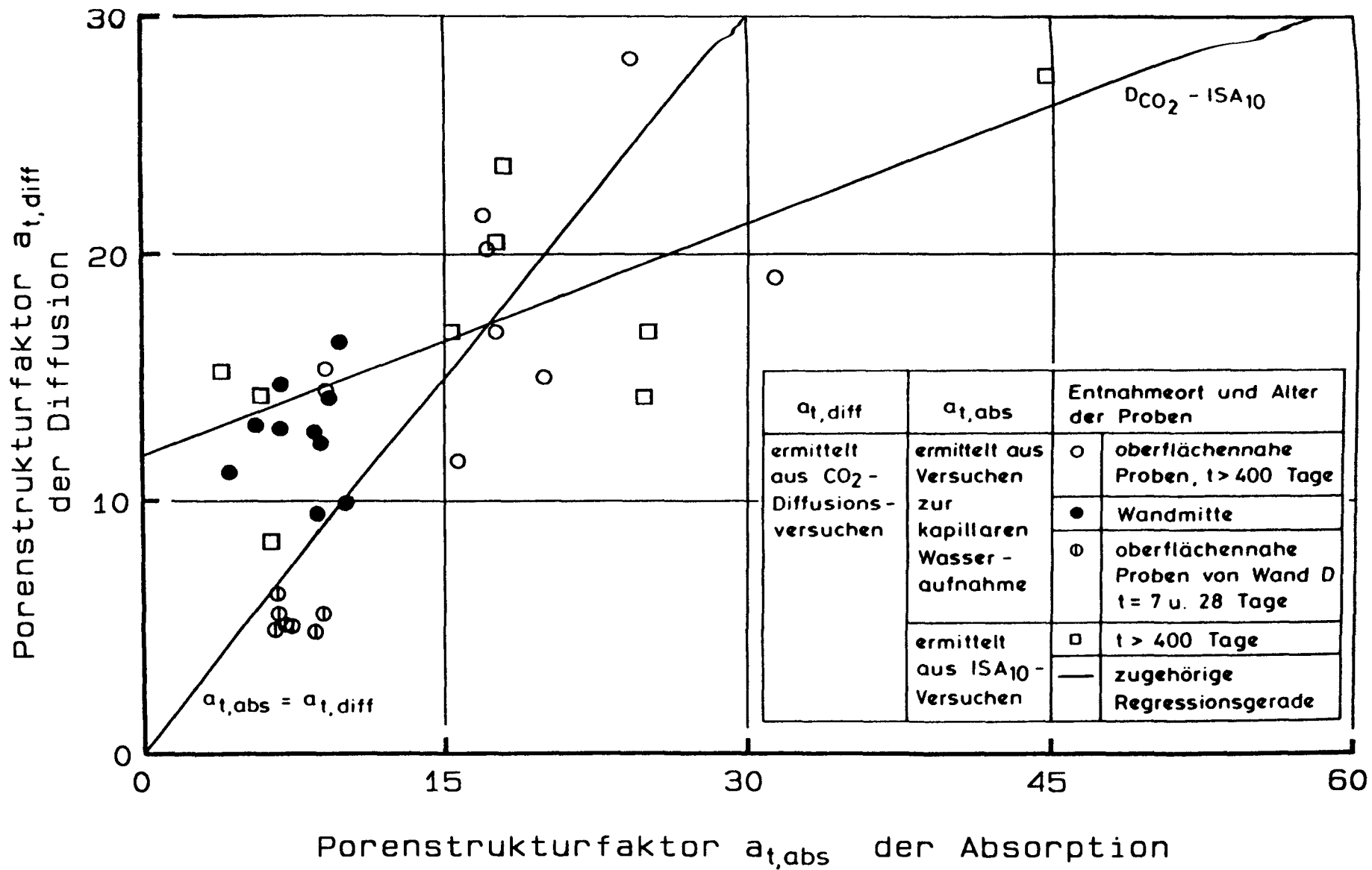


Bild D160

Korrelation des Porenstrukturfaktors der Diffusion mit dem Porenstrukturfaktor der Absorption für die Versuche an den Wänden A - D (getrennt nach Versuchsart und Entnahmeort der Proben).

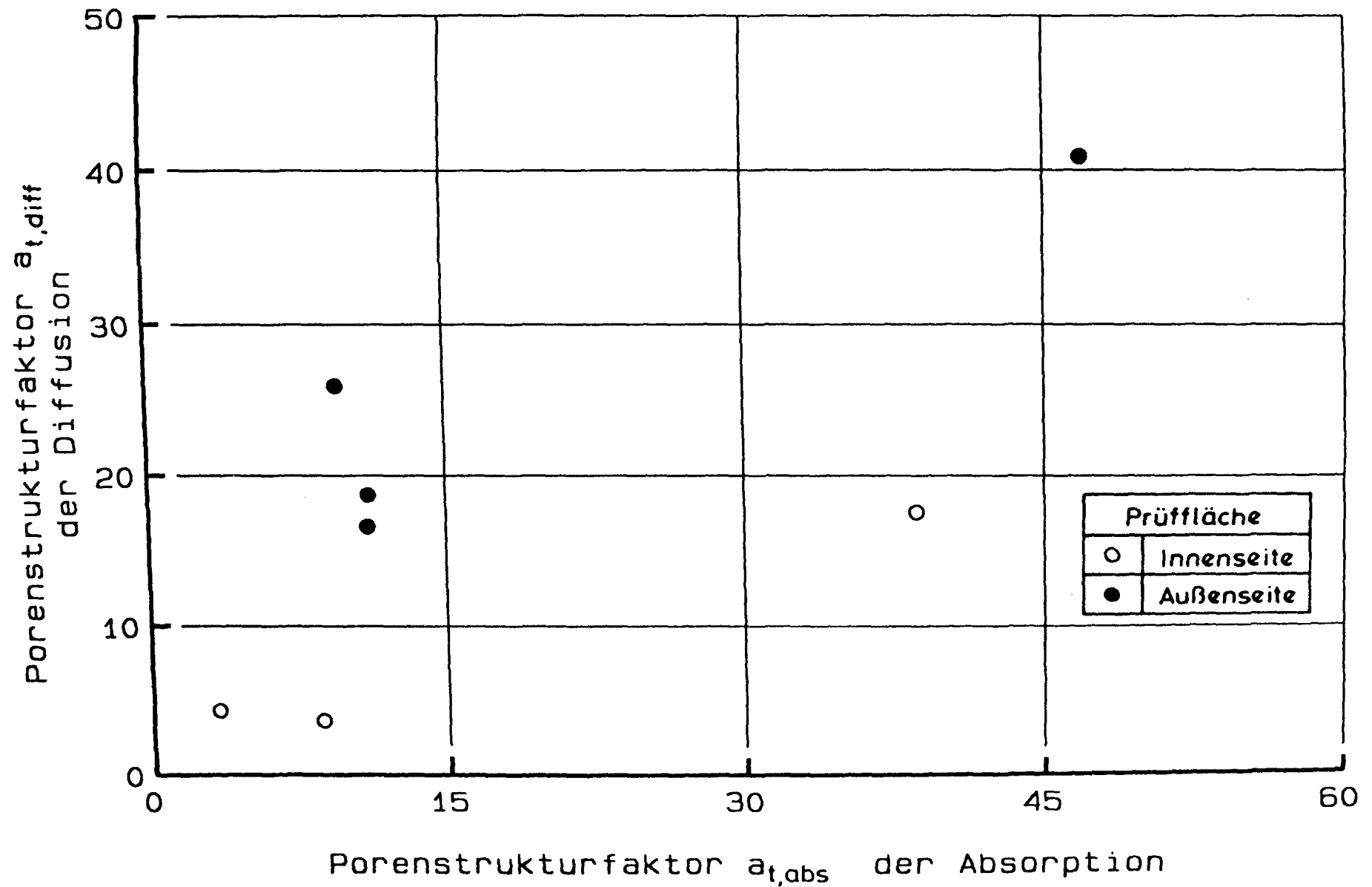


Bild D161

Korrelation des Porenstrukturfaktors der Diffusion mit dem Porenstrukturfaktor der Absorption für die Versuche an den Versuchshäusern in Beckum.

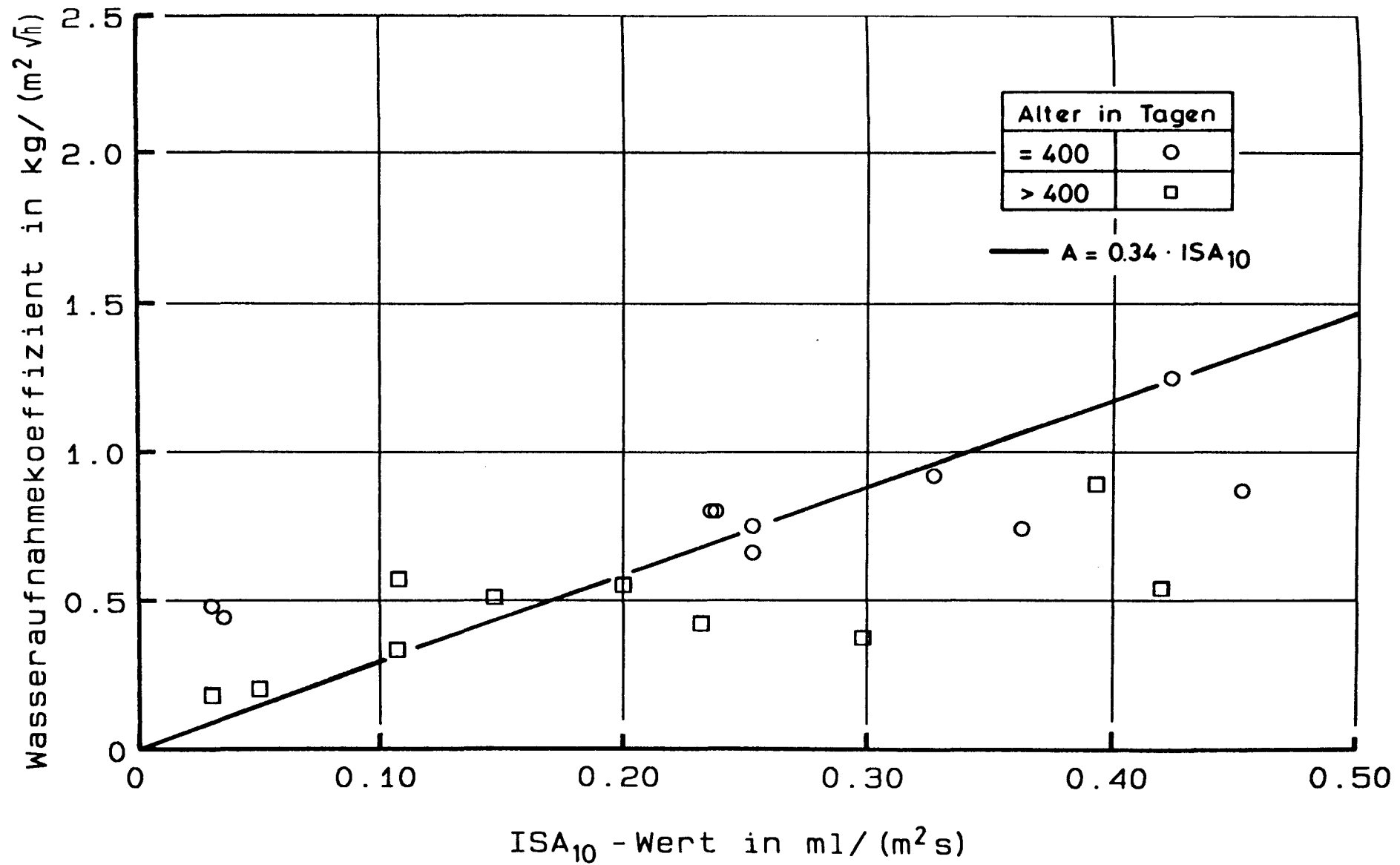


Bild D162

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA₁₀-Wertes des oberflächennahen Betons der Wände A - D getrennt nach dem Betonalter.

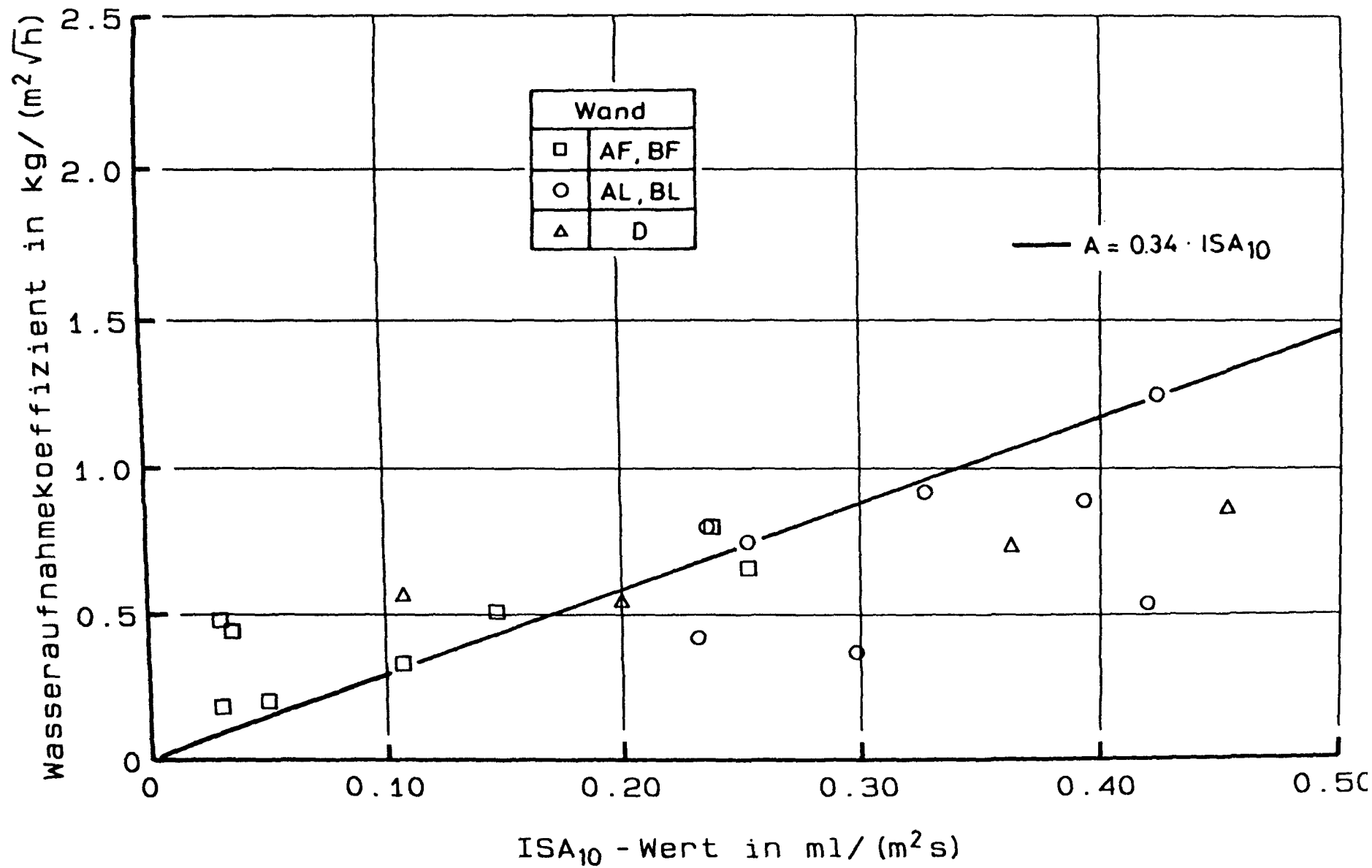


Bild D163

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA₁₀-Wertes des oberflächennahen Betons der Wände A - D getrennt nach den Lagerungsbedingungen.

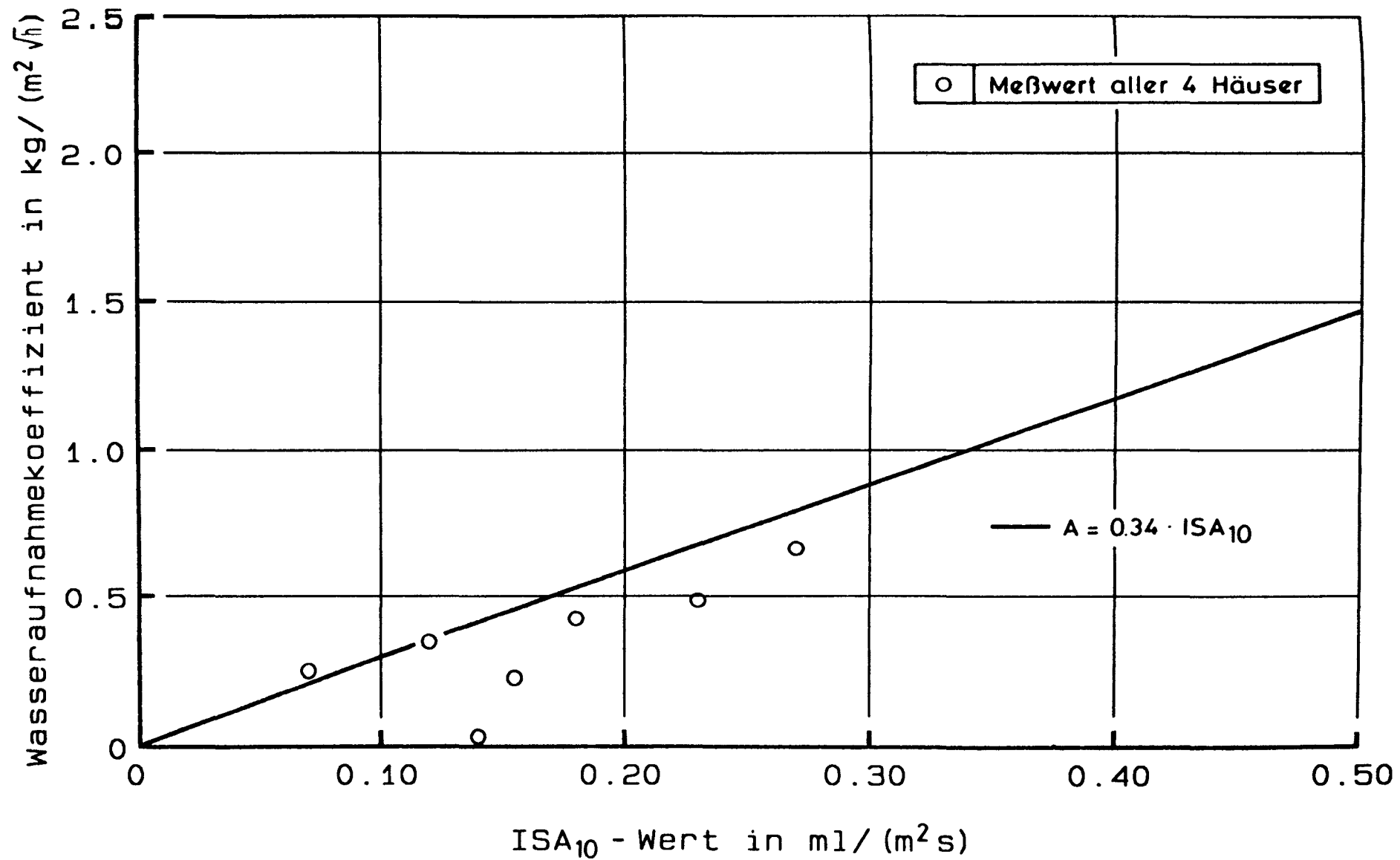


Bild D164

Korrelation des Wasseraufnahmekoeffizienten und des ISA₁₀-Wertes des oberflächennahen Betons der Versuchshäuser aus Beckum.

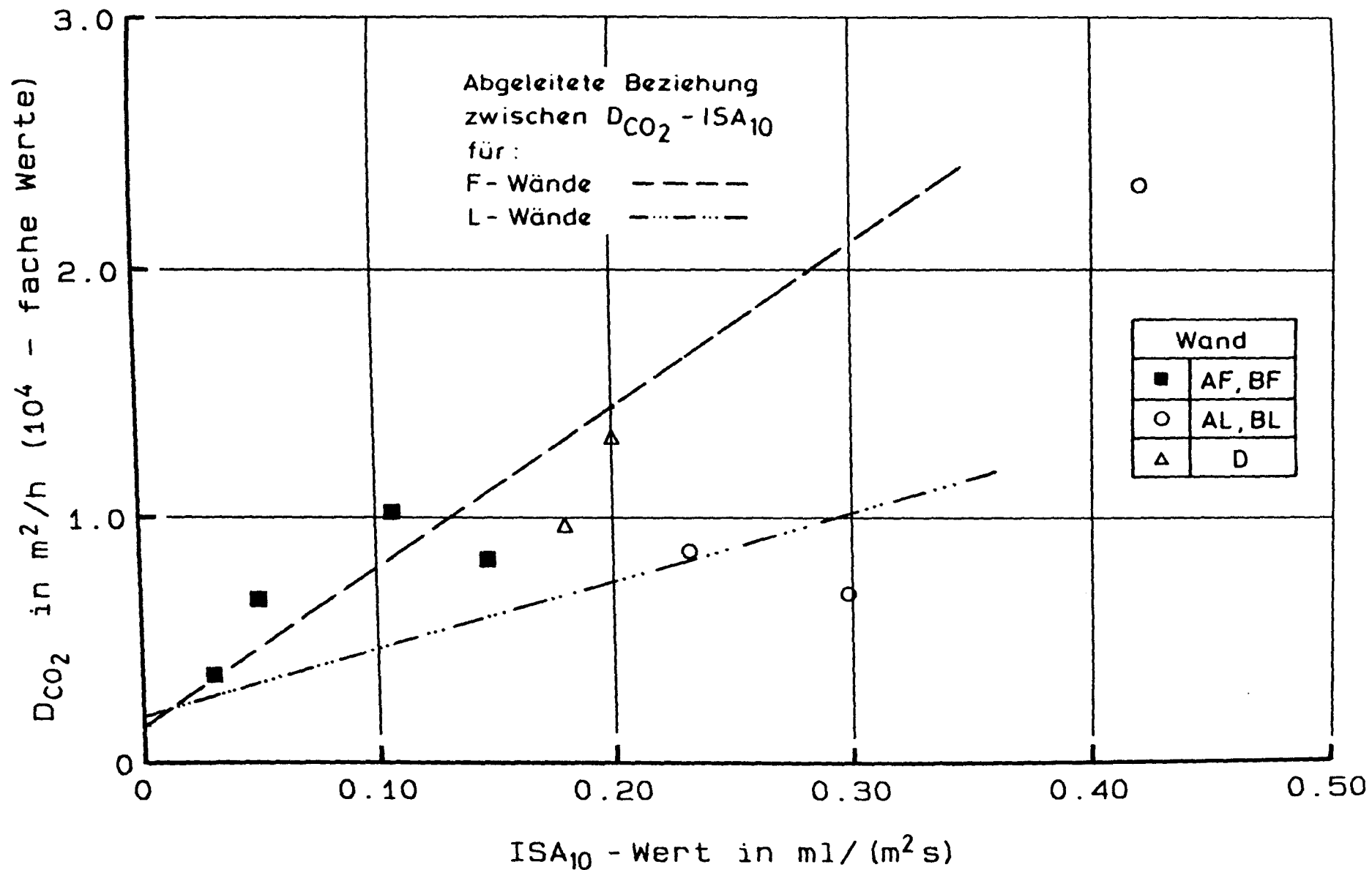


Bild D165

Korrelation des CO_2 - Diffusionskoeffizienten und des ISA_{10} -Wertes des oberflächennahen Betons der Wände A - D getrennt nach den Lagerungsbedingungen (einschließlich eines Vergleiches mit der abgeleiteten Beziehung beider Kennwerte).

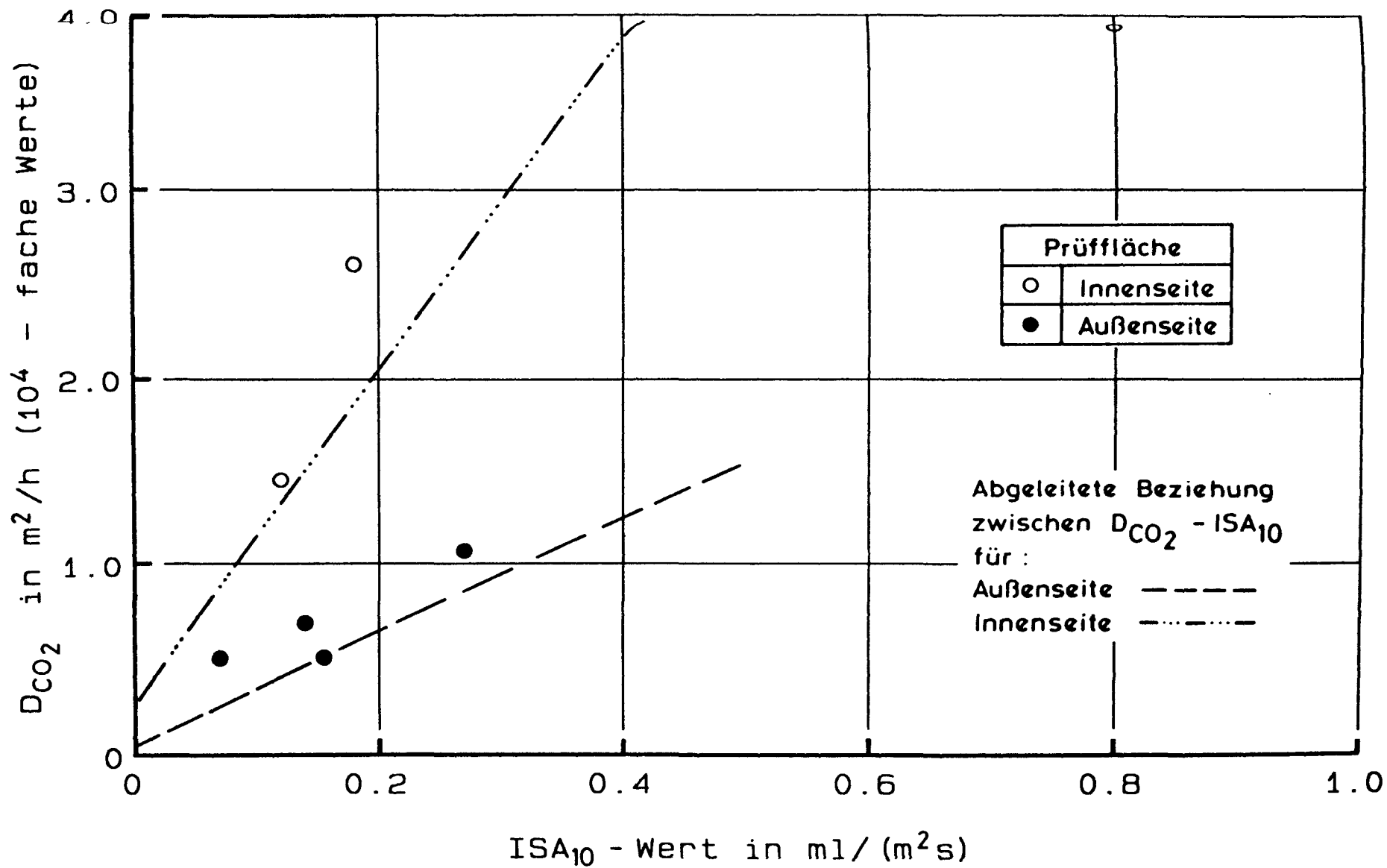


Bild D166

Korrelation des CO₂ - Diffusionskoeffizienten und des ISA_{10} -Wertes des oberflächennahen Betons der Versuchshäuser aus Beckum (einschließlich eines Vergleiches mit der abgeleiteten Beziehung beider Kennwerte).

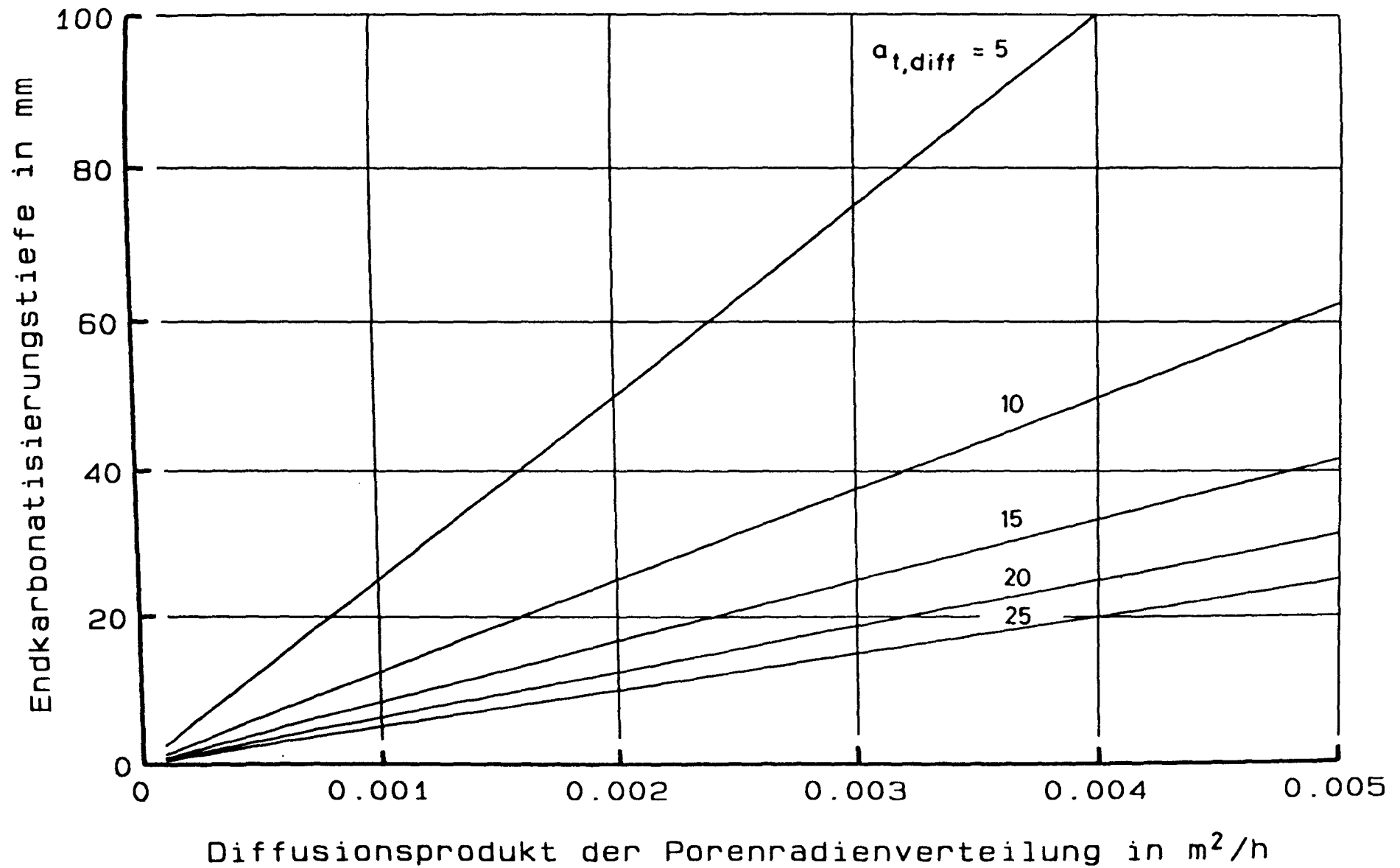


Bild D167

Schätzwert der Endkarbonatisierungstiefe in Abhängigkeit des Diffusionsproduktes der Porenradienverteilung und des Porenstrukturfaktors der Diffusion $a_{t,\text{diff}}$.

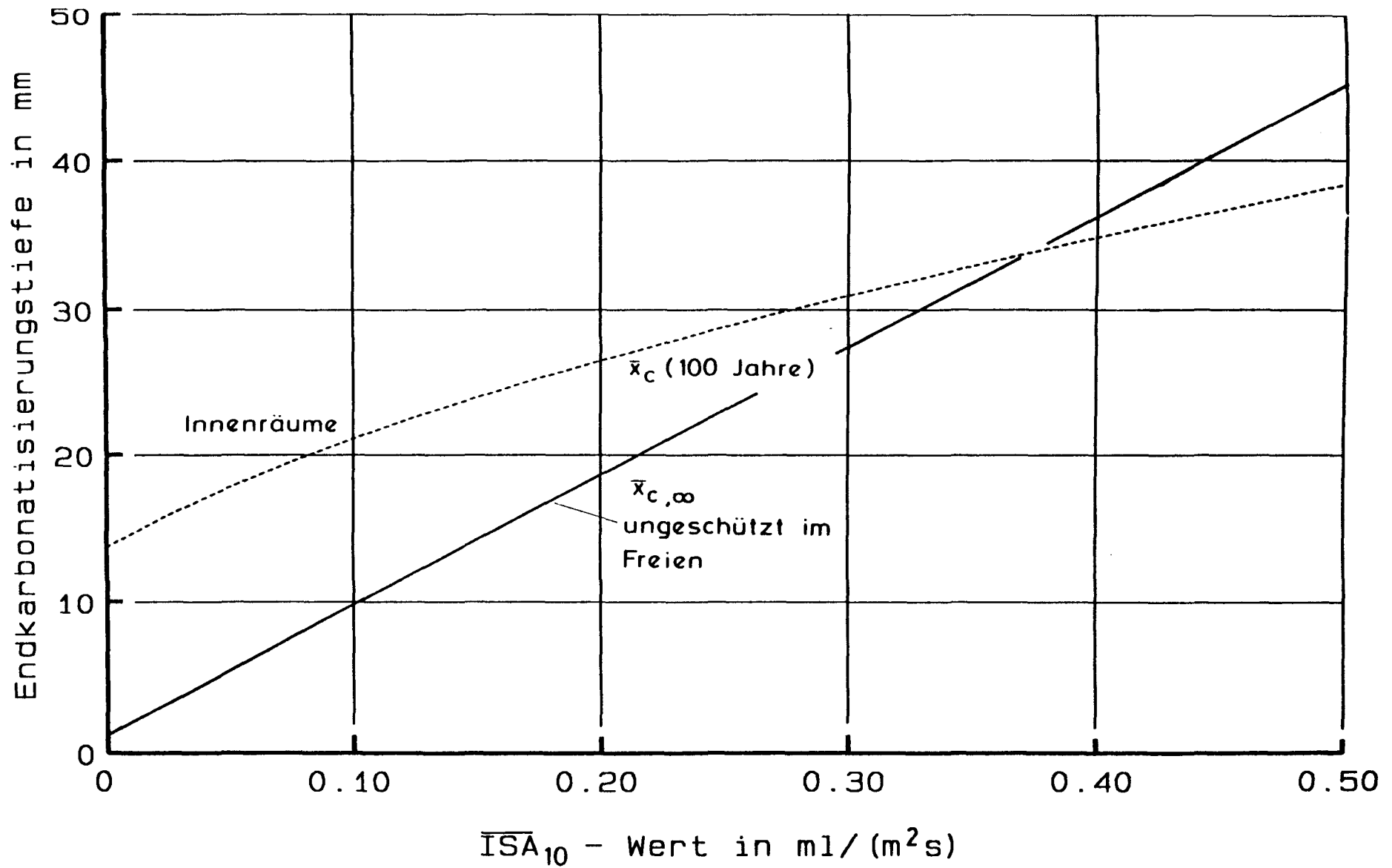


Bild D168

Schätzwert der Endkarbonatisierungstiefe in Abhängigkeit des ISA_{10} - Wertes für die beiden Lagerungsbedingungen ungeschützt im Freien und Laborbedingungen (Innenräume).

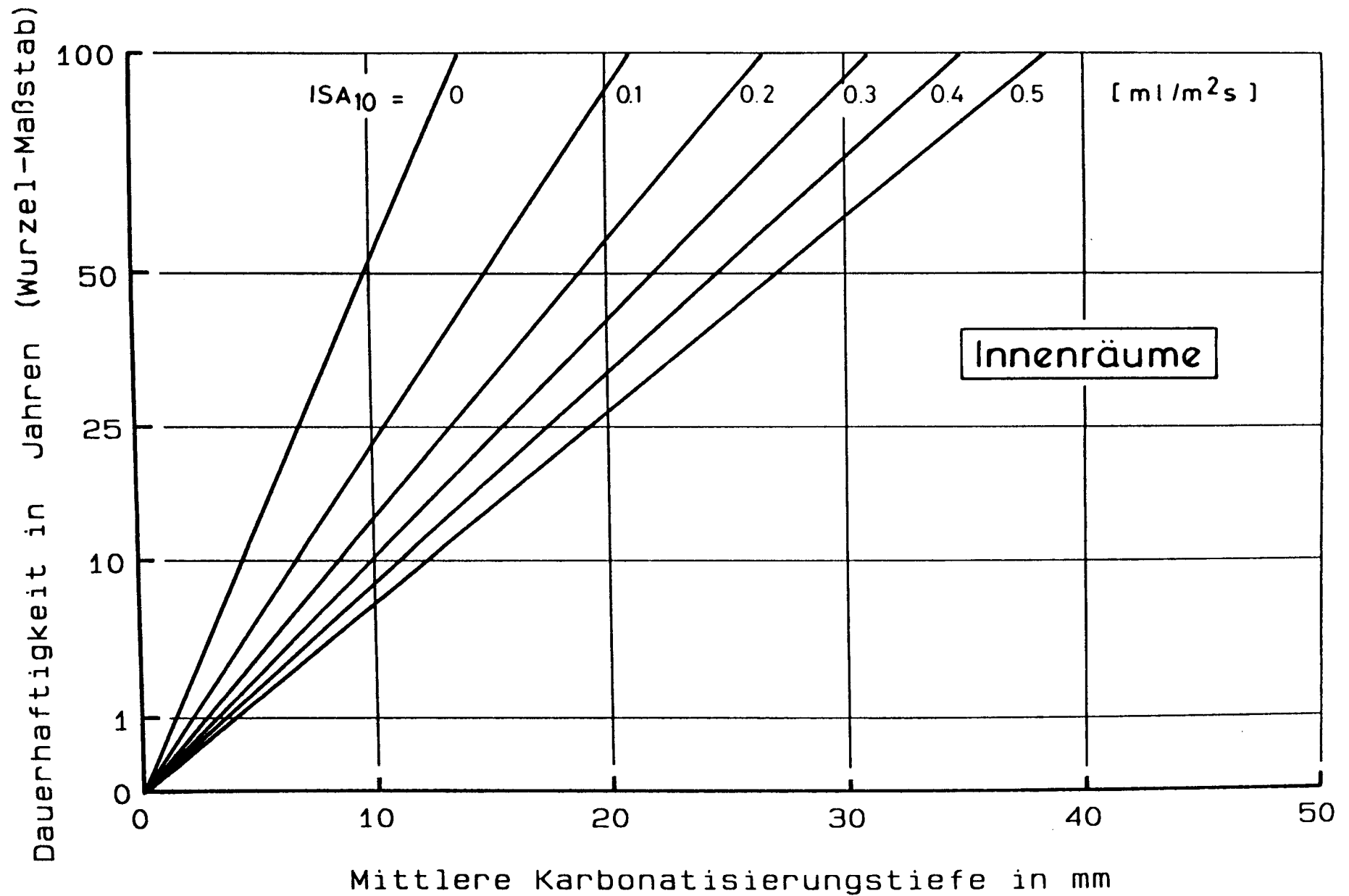


Bild D169

Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierung in Abhängigkeit des ISA_{10} - Wertes für den Beton von Innenbauteilen.

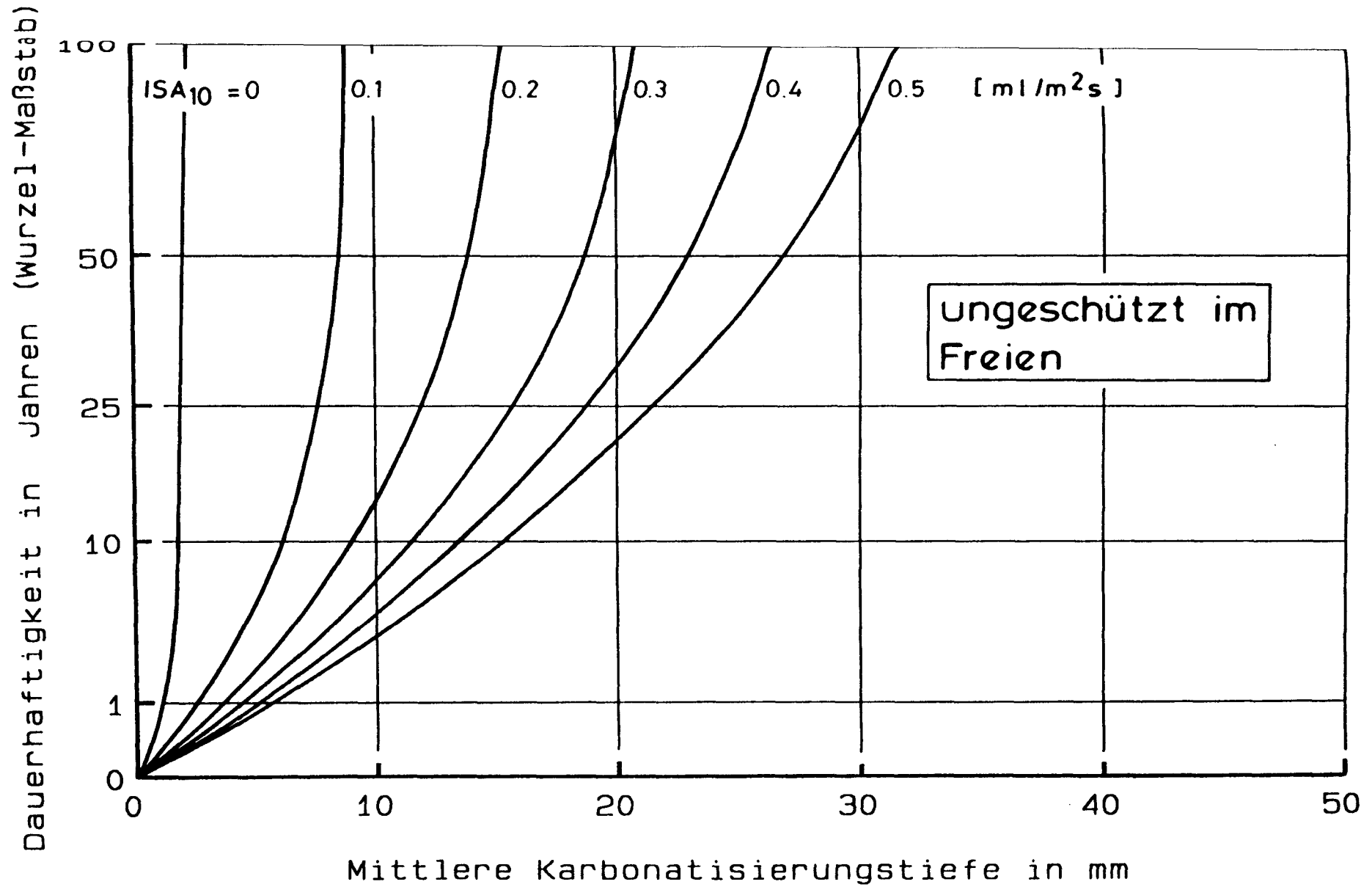


Bild D170

Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierung in Abhängigkeit des ISA_{10} - Wertes für den Beton von Außenbauteilen (ungeschützt im Freien).

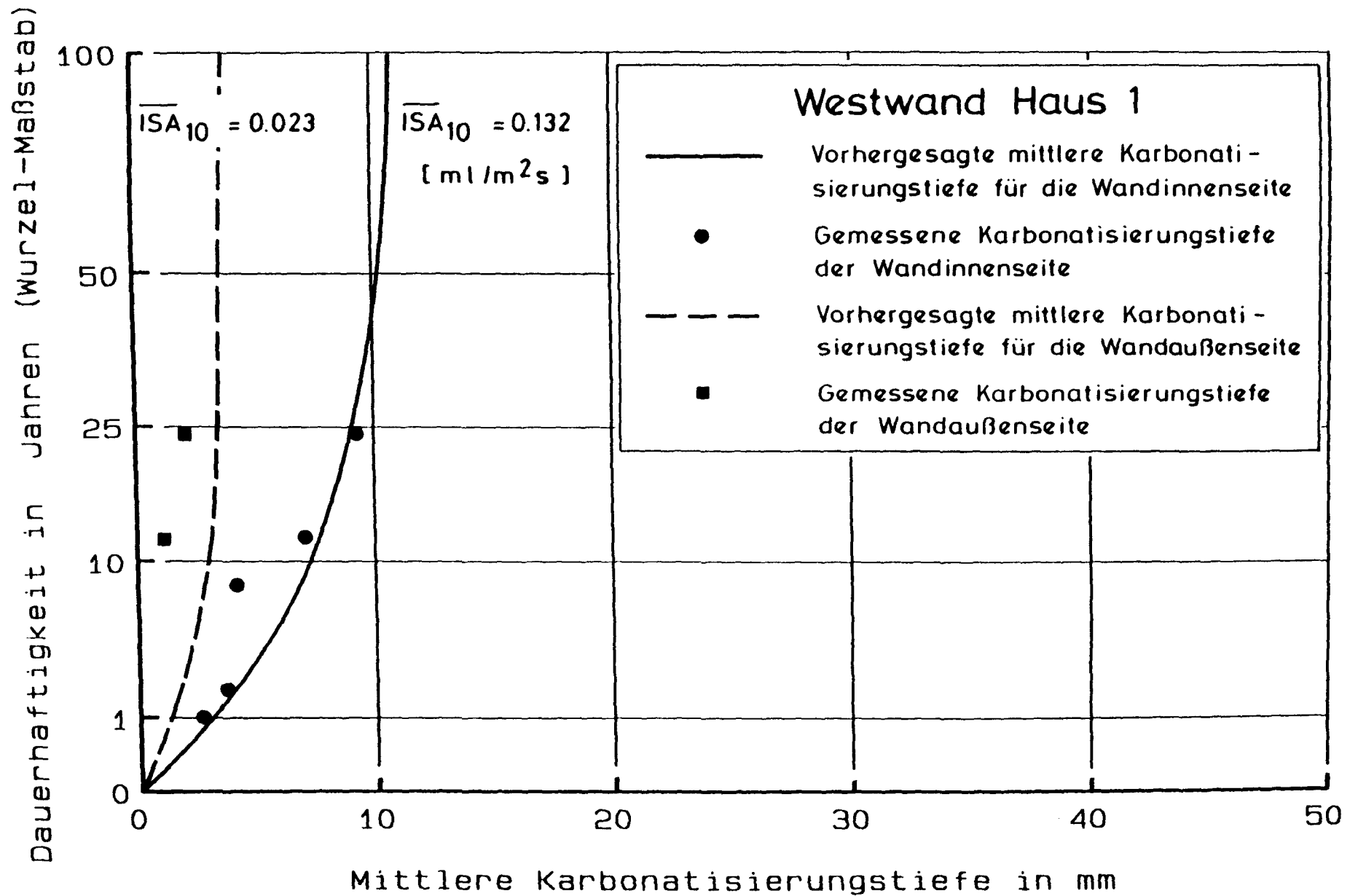


Bild D171

Vergleich der gemessenen Karbonatisierungstiefe mit der auf Grundlage des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells vorhergesagten Karbonatisierungstiefe für die Westwand von Versuchshaus 1 aus Beckum.

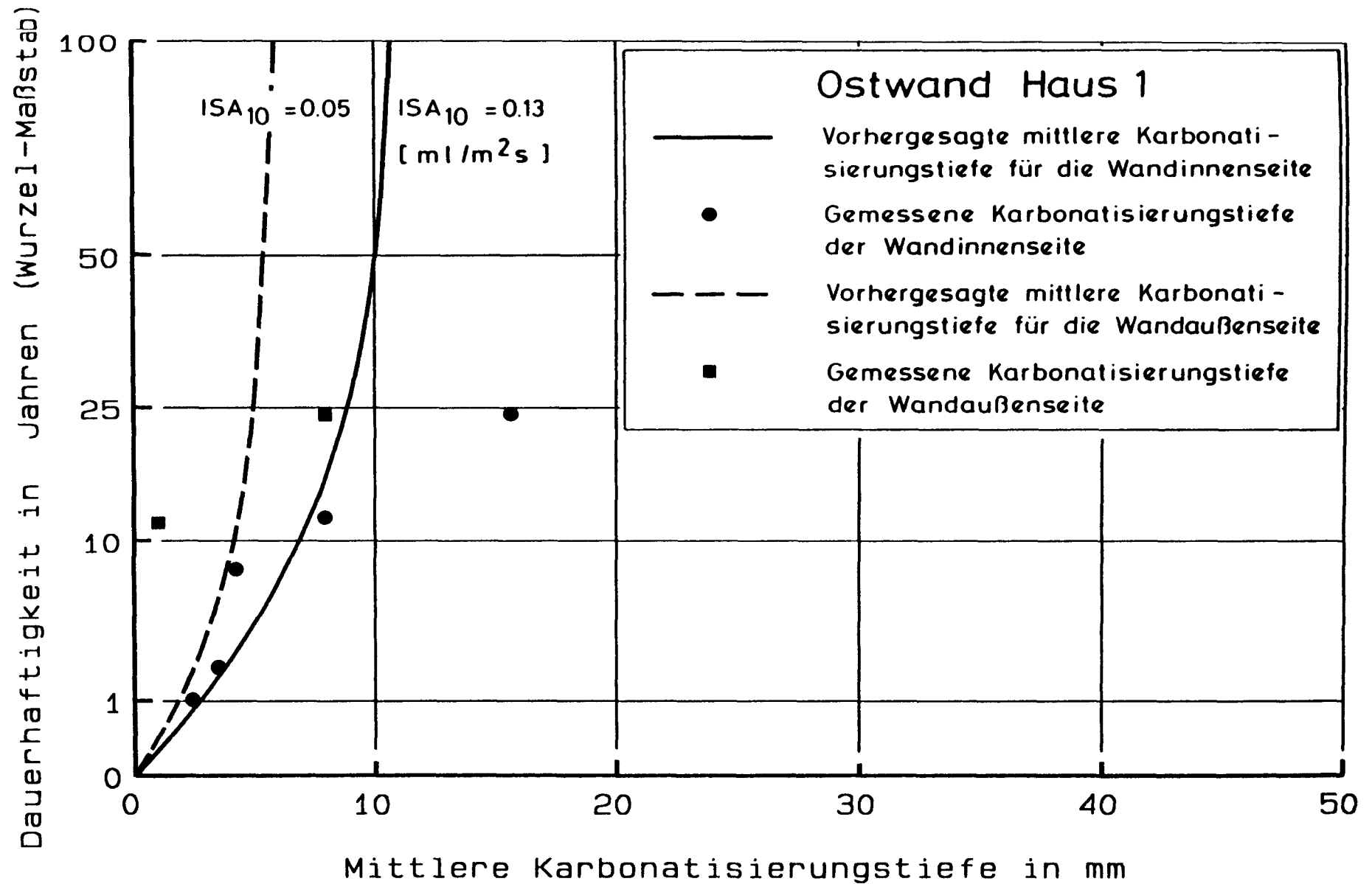


Bild D172

Vergleich der gemessenen Karbonatisierungstiefe mit der auf Grundlage des vorläufigen Dauerhaftigkeitsmodells vorhergesagten Karbonatisierungstiefe für die Ostwand von Versuchshaus 1 aus Beckum.

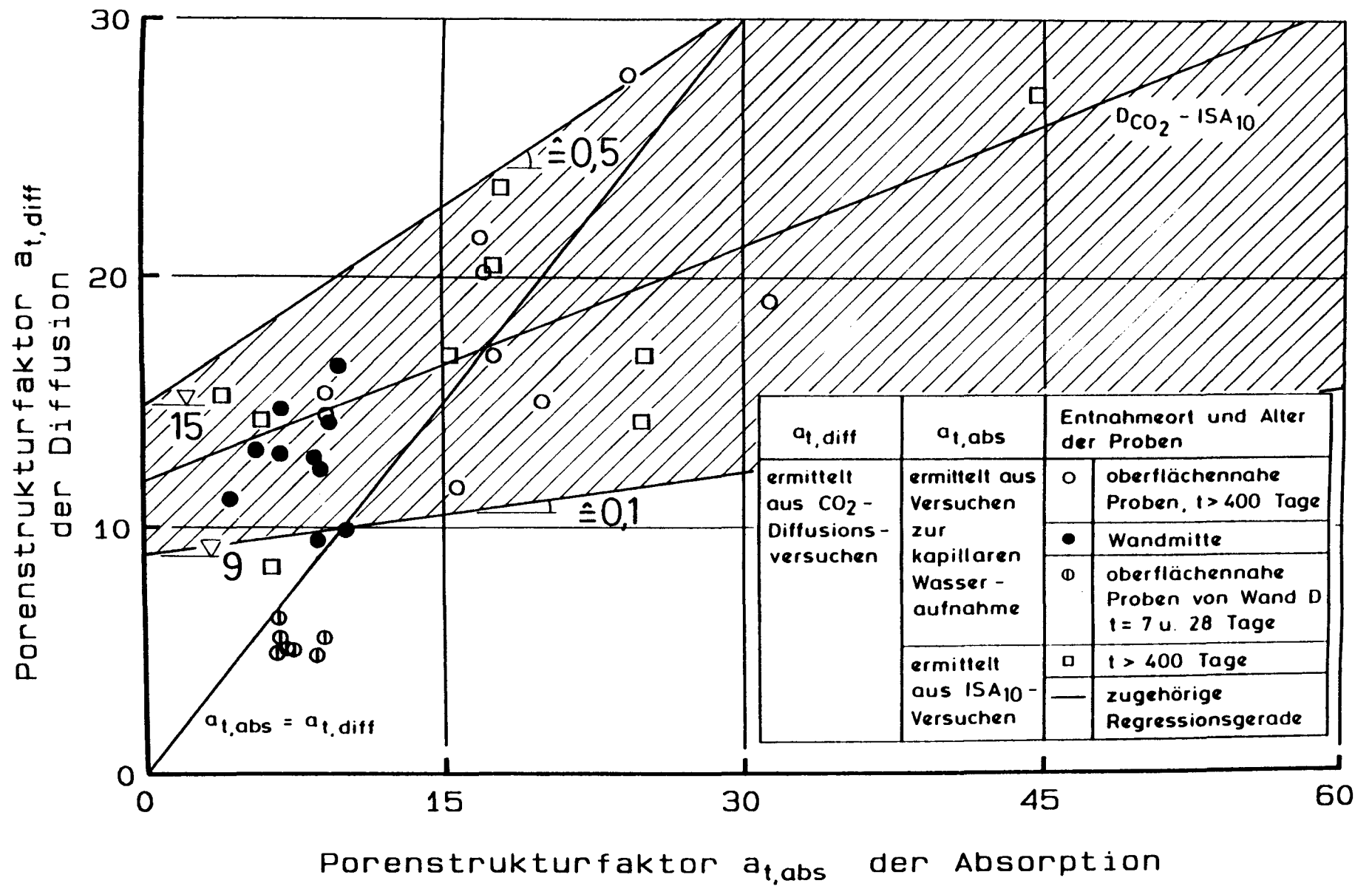


Bild D173

Streuband der Porenstrukturfaktoren für Fall 5 - 8 der Berechnung von c_1 und c_2 nach Abschn. 6.3.

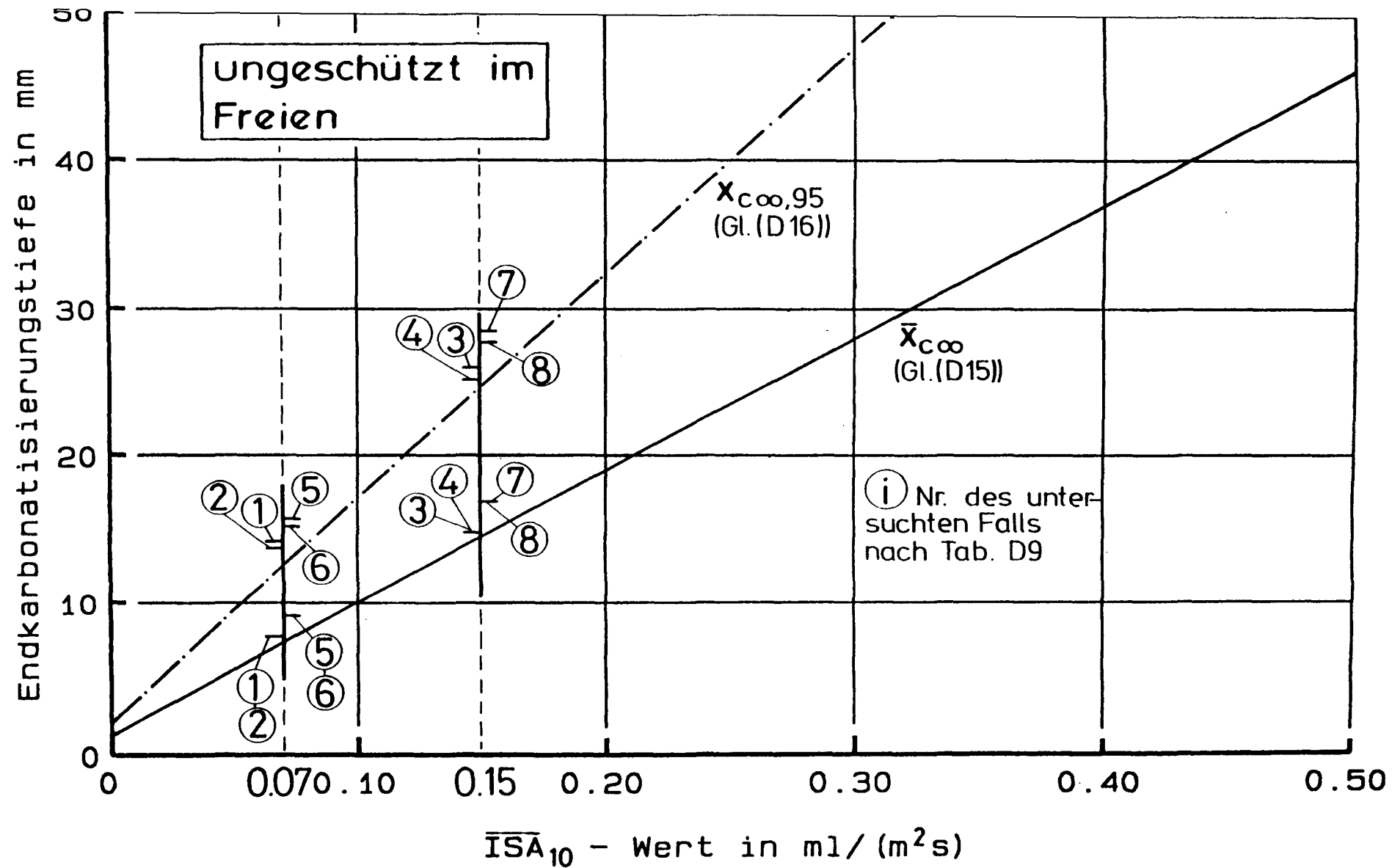


Bild D174

Vergleich der Ergebnisse von Gl. (D15) und (D16) mit denen der Simulationsrechnung nach Abschn. 6.3.